



**Vicente Relvas
Soares de Almeida**

**Otimização do sistema de controlo de temperatura
de ferramentas moldantes por recurso a canais
conformais**

Esta dissertação teve o apoio dos
projetos

UID/SEM/00481/2019-FCT – FCT –
Fundação para a Ciência e a
Tecnologia;

CENTRO-01-0145-FEDER-022083 -
Programa Operacional Regional do
Centro (Centro2020), através do
Portugal 2020 e do Fundo Europeu de
Desenvolvimento Regional;



**Vicente Relvas
Soares de Almeida**

**Otimização do sistema de controlo de temperatura
de ferramentas moldantes por recurso a canais
conformais**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica da Professora Doutora Mónica Sandra Abrantes de Oliveira Correia, Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro e da Doutora Tatiana Vladimirovna Zhiltsova, Investigadora do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

Esta dissertação teve o apoio dos
projetos

UID/SEM/00481/2019-FCT – FCT –
Fundação para a Ciência e a
Tecnologia;

CENTRO-01-0145-FEDER-022083 -
Programa Operacional Regional do
Centro (Centro2020), através do
Portugal 2020 e do Fundo Europeu de
Desenvolvimento Regional;

Ao meu Pai.

o júri

presidente

Prof. Doutor António Gil D'Orey de Andrade Campos
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

arguente

Prof. Doutor Joel Oliveira Correia Vasco
Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Superior de Tecnologia e Gestão – Instituto Politécnico de Leiria

orientadora

Prof.^a Doutora Mónica Sandra Abrantes de Oliveira Correia
Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Em primeiro lugar agradeço à Professora Mônica pela nobre docência ao longo destes últimos dois anos de curso e em especial à ilustre orientação prestada, prestigiando esta Instituição e este curso.

À Doutora Tatiana agradeço de igual forma todo o empenho, esforço, dedicação e paciência.

À minha Mãe e à minha Irmã, pelo constante sentimento de realização que me proporcionam todos os dias, pelo incansável apoio e por tudo o que fazem por mim.

À restante família, um agradecimento por todo o estímulo e presença nesta caminhada, em especial aos Avós, pelos valores e ensinamentos que sempre transmitem.

Aos amigos, pela sempre presente amizade em todos os momentos.

Aos colegas de curso, por todos os bons momentos e companheirismo ao longo destes cinco anos.

Por fim, um agradecimento muito especial ao meu Pai, que permitiu tudo isto. A Sua saudade é a dor suave que traz à memória momentos que o tempo não apagou. Por fazer de mim a pessoa que sou hoje, esta dissertação é em sua homenagem, pelo Pai que foi e sempre será no meu coração.

palavras-chave

Moldação por injeção, Canais conformais, AMI®, Tempo de ciclo, Empeno, Sistema de arrefecimento, Processos aditivos, Cool FEM 3D

resumo

A moldação por injeção é atualmente um dos mais importantes e versáteis métodos utilizados no fabrico de peças plásticas. O tempo de ciclo durante o processo de moldação por injeção é devido, sobretudo, ao tempo de arrefecimento, que, deste modo, tem um elevado impacto naquele que é um aspeto essencial para esta indústria, o binómio cadência de produção e conformidade. No entanto, é o compromisso entre o tempo e remoção eficaz da carga térmica que acaba por ditar o cumprimento dos requisitos globais da peça, particularmente no que concerne estabilidade dimensional.

A utilização de canais conformais permite uma redução do tempo de arrefecimento e da heterogeneidade térmica, essencialmente por permitir uma maior remoção da carga térmica por convecção. Um melhor posicionamento de linhas de água junto de cargas térmica localizadas, ou seja, junto de detalhes e regiões a que não seria possível aceder por recurso a estratégias convencionais, tornam estas soluções interessantes do ponto de vista térmico, motivando estudos paramétricos, no sentido de compreender a sua mais-valia efetiva, pois não são desprovidas de desafios tecnológicos.

No estudo aqui apresentado, foram formulados 6 casos de estudo, por forma a desenvolver um estudo numérico que permitisse comparar a eficácia de diferentes estratégias de arrefecimento quando comparadas com outra levada a efeito por recurso a canais conformais. Tendo por base o estudo realizado e as relações retiradas do estudo paramétrico, realizou-se um outro estudo tendo como objetivo a otimização dos resultados anteriormente obtidos, tendo-se efetivamente conseguido refinar os resultados e perceber algumas mais-valias e condicionantes da utilização de estratégias de arrefecimento por recurso a canais conformais.

keywords

Injection Molding, Conformal cooling, AMI®, Cycle time, Warpage, Cooling System, Additive processes, Cool FEM 3D

abstract

Injection molding is currently one of the most important and versatile methods used to produce plastic parts. The cycle time during the injection molding process is mainly due to the cooling time, which thus has a high impact on what is an essential aspect for this industry, the production cadence and conformity. However, it is the compromise between time and effective removal of thermal load that ends up dictating compliance with the overall requirements of the part, particularly in what concerns dimensional stability.

The use of conformal channels allows a reduction in cooling time and thermal heterogeneity, essentially because it allows for greater removal of thermal load by convection. A better positioning of cooling channels, essentially closer to higher thermal loads, or closer to details and regions to which it would not be possible to access by using conventional strategies, make these solutions worth to study, in order to understand their effective added value, since they are not deprived of technological challenges.

In the study here presented, 6 case studies were formulated in order to develop a numerical study that would allow comparing the efficacy of different cooling strategies when compared with another one carried out using conformal channels. Based on the study conducted and the conclusions withdrawn, the strategy was refined. The observation of the results from the refined strategy enabled to perceive some added value, but also some conditioning factors when using cooling strategies by using conformal channels.

Conteúdos

1. Introdução	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Objetivos	1
1.3. Guia de leitura.....	1
2. Estado de Arte.....	3
2.1. Introdução	4
2.2. Processo de moldação por injeção	4
2.3. Sistema de controlo de temperatura	6
2.3.1. Canais ligados em paralelo, em série e as suas variantes	7
2.3.2. Lâmina separadora (palheta).....	8
2.3.3. Cascata com núcleo de refrigeração	8
2.3.4. Pinos térmicos	9
2.3.5. Insertos/Postiços de diferentes materiais	10
2.3.6. Canais conformais	10
2.3.6.1. Processos de fabrico.....	11
2.4. Atuais sistemas de controlo de temperatura	18
2.5. Metodologia para aplicação de um sistema de controlo de temperatura por canais conformais	21
2.5.1. Tipo de Peça	21
2.5.2. Peça Técnica/Peça Comum.....	22
2.5.3. Fator Económico	24
2.5.4. Tempo de Ciclo/Cadência de produção	27
3. Metodologia de Análise	31
4. Peça em estudo.....	33
4.1. Peça	33
4.2. Material	33
4.3. Dimensões	35
4.4. Molde	37
4.5. Máquina de Injeção	40
4.6. Condições de processamento	40
4.7. Estudo de independência da malha	41
4.8. Sistema de Arrefecimento.....	44
4.9. Sistema de Alimentação	50
4.9.1. Modelação do sistema de alimentação	51
4.10. Malha do Molde.....	52
4.11. Inserto	56

5. Análise numérica das várias configurações de arrefecimento	57
5.1. Sistema de canais convencionais	59
5.2. Sistema de canais com lâminas separadoras	60
5.3. Sistema de canais com o núcleo de refrigeração/sistemas borbulhantes	62
5.4. Inserto de alta condutividade térmica (<i>AMPCO 940®</i>)	64
5.4.1. Inserto com linha de água interior	65
5.4.2. Sistema de canais convencionais com inserto	68
5.5. Sistema de canais conformais	70
6. Discussão de Resultados	77
6.1. Arrefecimento	77
6.1.1. Tempo até atingir os critérios de extração	77
6.1.2. Distribuição de temperatura	79
6.1.2.1. Sistema de canais convencionais	80
6.1.2.2. Sistema de canais com lâminas separadoras	81
6.1.2.3. Sistema de canais com o núcleo de refrigeração/sistemas borbulhantes	83
6.1.2.4. Inserto com alta condutividade térmica (<i>AMPCO 940®</i>)	84
6.1.2.4.1. Inserto com linha de água interior	84
6.1.2.4.2. Sistema de canais convencionais com inserto	85
6.1.2.5. Sistema de canais conformais	86
6.1.2.6. Avaliação global	87
6.2. Deflexão	90
7. Caso de estudo otimizado	97
7.1. Modelação e simulação	98
7.2. Resultados	101
7.2.1. Tempo até atingir os requisitos de extração	101
7.2.2. Distribuição de temperatura	102
7.2.3. Deflexão	105
8. Conclusões	107
9. Trabalhos Futuros	109
10. Referências	111
11. Anexos	117

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Processos aditivos para o processamento de metais – adaptada de [24, 25]	12
Tabela 2 - Comparação entre as características entre o PC e o PMMA [58-60]	34
Tabela 3 - Valores típicos do PC LEXAN™ RESIN 103R [65]	35
Tabela 4 – Componentes principais do molde e dimensões da placa da cavidade e da bucha	40
Tabela 5 - Condições de processamento utilizadas	41
Tabela 6 – Resultados do estudo de independência de malha	43
Tabela 7 - Posicionamento dos canais de arrefecimento	49
Tabela 8 - Valores utilizados para o aço do molde [76]	55
Tabela 9 – Estatísticas da malha do molde do caso de estudo 5.1	60
Tabela 10 - Estatísticas da malha do molde do caso de estudo 5.2	62
Tabela 11 - Estatísticas da malha do molde do caso de estudo 5.3	64
Tabela 12 - Valores utilizados para o inserto do molde (AMPCO 940®) [76]	64
Tabela 13 - Estatísticas da malha do inserto do caso de estudo 5.4.1	66
Tabela 14 - Estatísticas da malha do canal 3D do caso de estudo 5.4.1	67
Tabela 15 - Estatísticas da malha do molde do caso de estudo 5.4.1	68
Tabela 16- Estatísticas da malha do inserto do caso de estudo 5.4.2	69
Tabela 17- Estatísticas da malha do molde do caso de estudo 5.4.2	70
Tabela 18 - Parâmetros do sistema de canais conformais	72
Tabela 19 - Estatísticas da malha do sistema de canais conformais (caso de estudo 5.5)	74
Tabela 20 - Estatísticas da malha do molde do caso de estudo 5.5	75
Tabela 21 – Valores das quotas críticas e respetiva variação (por deflexão) nas diferentes arquiteturas de arrefecimento	91
Tabela 22 - Tabela resumo das deflexões (em módulo) de cada geometria relativas ao efeito da contração diferencial e arrefecimento diferencial	92
Tabela 23 - Parâmetros do sistema de canais conformais otimizados	98
Tabela 24 - Estatísticas da malha do sistema de canais conformais otimizados	100
Tabela 25 - Estatísticas da malha do molde do caso de estudo otimizado	101
Tabela 26 - Tabela resumo das deflexões (em módulo) de cada geometria relativas ao efeito da contração diferencial e arrefecimento diferencial inclusive o caso de estudo otimizado	105

(Esta página foi intencionalmente deixada em branco)

Lista de Figuras

Figura 1 - Ciclo de moldação por injeção e etapas do tempo de ciclo – adaptada de [7]	4
Figura 2 - Cilindro de Injeção e pormenor de molde - adaptada de [8]	5
Figura 3 - Esquema de uma máquina de injeção e do sistema de controlo de temperatura - adaptada de [7]	6
Figura 4 - Balanço Térmico do molde – adaptada de [14]	7
Figura 5 - Circuitos de refrigeração ligados em paralelo, em série e algumas variantes - adaptada de [14, 15]	7
Figura 6 - Circuito com lâmina separadora de uma bucha (esquerda) e de uma cavidade (direita) e lâmina separadora em espiral – adaptada de [14]	8
Figura 7 - Circuito em cascata com núcleo de refrigeração (sistema borbulhante) e núcleo de refrigeração helicoidal: 1) Helicoidal simples 2) Helicoidal dupla – adaptada de [14].....	9
Figura 8 – Pino térmico em secção com linha de água (esquerda) e representação do princípio do seu funcionamento (direita) – adaptada de [14, 16]	10
Figura 9 - Aplicações de canais conformais em buchas e cavidades - adaptada de [19-21]	11
Figura 10 – Princípio de funcionamento da Impressão 3D de aglomerante – adaptada de [25]	13
Figura 11 – Princípio de funcionamento FDM – adaptada de [24]	14
Figura 12 – Princípio do funcionamento de fusão em cama de pó (SLM) – adaptada de [30]	16
Figura 13 - Princípio de funcionamento de EBM – adaptada de [31]	16
Figura 14 - Princípio do funcionamento da deposição direta de energia – adaptada de [26]	17
Figura 15 – Princípio do funcionamento da Laminação por folhas (LOM) – adaptada de [26].....	18
Figura 16 - Exemplo da aplicação canais conformais em série (em cima) e em paralelo (em baixo) – adaptada de [20]	20
Figura 17 - Etapas na modularização do desenho das linhas de arrefecimento - adaptada de [33].	21
Figura 18 - Comparação entre a evolução da temperatura da superfície do molde nos canais paralelos e conformais – adaptada de [33].....	23
Figura 19 - Comparação entre tipologias de canais de arrefecimento pela sua secção longitudinal – adaptada de [44]	25
Figura 20 – Peça com canais conformais em Moldflow® (esquerda) e bucha com os mesmos canais obtidos por fresagem (direita) – adaptada de [34].....	26
Figura 21 - Etapas do estudo – adaptada de [11]	31
Figura 22 – Peça em estudo [57]	33
Figura 23 – Vista em perspetiva da peça e vista da secção em corte com as respetivas dimensões	36
Figura 24 - Pormenor da linha de partição e dos lados da bucha e cavidade.....	36
Figura 25 – Cotas críticas do copo e respetivo toleranciamento.....	37
Figura 26 - Superfície de partição definida a laranja (esquerda) e macho e cavidade resultante (direita).....	38
Figura 27 - Vista em perspetiva (esquerda) e vista ortogonal (direita) do modelo tridimensional obtido (molde e porta-molde).....	39
Figura 28 – Modelo utilizado na simulação de Arrefecimento + Enchimento (malha de 3mm).....	42
Figura 29 - Distâncias relativas aos canais de arrefecimento em elementos moldantes – adaptada de [14]	49
Figura 30 – Sistema de Arrefecimento obtido com recurso do AMI® e dimensões correspondentes na vista de cima (esquerda) e na vista de lado (direita)	49
Figura 31 - Indicador de resistência ao fluxo (esquerda) e conformidade para ataques (direita)	50
Figura 32 - Bico Quente Techni Shot H334051/50x100 e respetivas dimensões – adaptada de [73]	51

Figura 33 - Sistema de Alimentação (em cima) e respectivas dimensões (em baixo)	52
Figura 34 – Superfície do molde (esquerda) e superfície do molde com malha aplicada (direita) ...	54
Figura 35 - Malha de superfície exterior e interior, com detalhe da malha de superfície interior no sistema de alimentação e na peça.....	54
Figura 36 - Malha 3D do molde definida com recurso aos seus pontos (vista em corte pelo plano ZY)	55
Figura 37 – Vista frontal do inserto com respectivas cotagens e detalhe do entalhe	56
Figura 38 - Procedimento geral em AMI®	58
Figura 39 - Vista superior da disposição dos componentes na geometria de arrefecimento do caso de estudo 5.1.....	59
Figura 40 – Vista superior (esquerda) e vista de lado em corte(direita) da disposição do sistema de arrefecimento do caso de estudo 5.2 com lâminas separadoras (a amarelo) no molde e distâncias ao bordo da peça (a vermelho) e entre si (a preto) correspondentes.....	61
Figura 41 - Vista superior (esquerda) e vista de lado em corte(direita) da disposição do sistema de arrefecimento do caso de estudo 5.3 com núcleo de refrigeração (a laranja) no molde e distâncias ao bordo da peça (a vermelho) e entre si (a preto) correspondentes.....	63
Figura 42 – Vista de lado (esquerda) e vista de cima (direita) do canal de arrefecimento do caso de estudo 5.4.1.....	65
Figura 43 – Vista de lado em corte (malha 3D) da disposição do sistema de arrefecimento do caso de estudo 5.4.1 com canal de arrefecimento (a azul), inserto (a laranja) e peça (a amarelo).....	66
Figura 44 - Vista de lado em corte da disposição do sistema de arrefecimento do caso de estudo 5.4.2 com sistema de canais convencionais (a azul), inserto (a laranja) e peça (a amarelo)	69
Figura 45 - Exemplos de tipologia de canais conformais – adaptada de [84]	71
Figura 46 - Distâncias relativas ao design de um sistema de canais tridimensionais ótimo em elementos moldantes – adaptada de [85]	72
Figura 47 - Vista de lado (esquerda) e perspetiva (direita) do sistema de canais conformais (caso de estudo 5.5).....	73
Figura 48 - Vista de lado em corte da disposição do sistema canais conformais do caso de estudo 5.5 com canal de arrefecimento (a azul) e peça (a amarelo).....	74
Figura 49 - Gráfico do tempo para atingir os critérios de extração pelas diferentes arquiteturas de arrefecimento.....	78
Figura 50 –Temperaturas do molde (em corte) do caso de estudo 5.1.....	81
Figura 51 - Temperaturas do molde (em corte) do caso de estudo 5.2.....	82
Figura 52 - Temperaturas na placa da bucha do molde (em corte) do caso de estudo 5.2	82
Figura 53 - Temperaturas no sistema de canais do caso de estudo 5.2	83
Figura 54 - Temperaturas do molde (em corte) do caso de estudo 5.3.....	84
Figura 55 - Temperaturas do molde segundo os dois planos (em corte) do caso de estudo 5.4.1...	85
Figura 56 - Temperaturas no molde (em corte) do caso de estudo 5.4.2.....	86
Figura 57 - Temperaturas no molde segundo os dois planos (em corte) do caso de estudo 5.5.....	87
Figura 58 - Pontos selecionados para a análise da temperatura ao longo da espessura.....	88
Figura 59 - Gráfico da temperatura ao longo da espessura na base da peça nas diferentes tipologias de arrefecimento.....	88
Figura 60 - Gráfico da temperatura ao longo da espessura na lateral da peça nas diferentes tipologias de arrefecimento.....	89
Figura 61 – Gráfico das deflexões máximas (em módulo) segundo cada geometria relativas ao efeito da contração diferencial e arrefecimento diferencial.....	93
Figura 62 –Sistema de canais conformais otimizados (representação)	99
Figura 63 - Vista de lado em corte da disposição do sistema de canais conformais otimizados (a azul) e da peça (a amarelo)	100

Figura 64 - Gráfico do tempo para atingir os critérios de extração pelas diferentes arquiteturas de arrefecimento com inclusão do caso de estudo otimizado	102
Figura 65 - Temperaturas no molde (em corte) do caso de estudo otimizado.....	103
Figura 66 - Gráfico da temperatura ao longo da espessura na base da peça nas diferentes tipologias de arrefecimento inclusive o caso de estudo otimizado	104
Figura 67 - Gráfico da temperatura ao longo da espessura na lateral da peça nas diferentes tipologias de arrefecimento inclusive o caso de estudo otimizado	104
Figura 68 – Gráfico das deflexões máximas (em módulo) segundo cada geometria relativas ao efeito da contração diferencial e arrefecimento diferencial inclusive o caso de estudo otimizado	106

(Esta página foi intencionalmente deixada em branco)

Abreviaturas

ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno
AIP®	<i>Autodesk Inventor Professional</i>
AMDL®	<i>Autodesk Moldflow Design Link</i>
AMI®	<i>Autodesk Moldflow Insight</i>
ANSYS	<i>Analysis Systems</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BEM	<i>Boundary Element Method</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CAE	<i>Computer Aided Engineering</i>
CNC	<i>Computer Numerical Control</i>
CPU	<i>Central Process Unit</i>
DMLS	<i>Direct Metal Laser Sintering</i>
DOE	<i>Design of Experiments</i>
EBM	<i>Electric Beam Melting</i>
FDMe	<i>Fused Deposition of metals</i>
FEM	<i>Finite Element Method</i>
LOM	<i>Laminated Object manufacturing</i>
PC	Policarbonato
PMMA	Polimetacrilato de Metilo (acrílico)
PP	Polipropileno
RHCM	<i>Rapid Heat Cycle Molding</i>
RT	<i>Rapid Tooling</i>
SLM	<i>Selective Laser Melting</i>
UAM	<i>Ultrasonic Additive Manufacturing</i>

(Esta página foi intencionalmente deixada em branco)

1. Introdução

1.1. Enquadramento

No mundo atual, é crucial que as empresas possuam capacidade de inovação, produzindo novos e melhores produtos para satisfazer ou exceder as expectativas dos clientes/mercado a um ritmo cada vez maior [1].

No panorama atual da indústria de moldes para o fabrico de peças plásticas, a competitividade é muito elevada e o desafio na redução do consumo de matérias primas e do consumo energético, ao mesmo tempo que se aumenta a produtividade para dar resposta a esta crescente procura, nunca foi tão grande.

Torna-se assim imperativo que esta indústria acompanhe a evolução das tecnologias que lhe permitem otimizar os seus processos de produção, neste caso específico, o processo de moldação por injeção. Uma dessas otimizações é o controlo de temperatura dos moldes com recurso a canais conformais, que tem vindo a ser comprovado que permite uma redução do tempo de ciclo pela redução do tempo de arrefecimento, tal como proporciona uma temperatura uniforme no molde e uma melhor estabilidade dimensional.

1.2. Objetivos

Embora esta tecnologia não seja nova, a indústria de momento está ainda ligeiramente apreensiva devido aos elevados custos e algumas limitações na sua implementação em moldes. Assim é necessário proceder a uma série de estudos que comprovem o benefício da utilização dos canais conformais para que o valor acrescentado empregue na produção do molde seja rentabilizado.

É no âmbito dos possíveis benefícios que surge esta dissertação, que tem por objetivos principais:

- Avaliar o desempenho do arrefecimento composta por canais conformais de uma peça;
- Averiguar as vantagens e desvantagens, ou seja, o impacto da sua utilização, mas também as suas limitações;
- Otimizar o sistema de arrefecimento através desta tecnologia;
- Recorrer a ferramentas de simulação numérica, no sentido de reduzir custos e tempo, em análises paramétricas experimentais;

1.3. Guia de leitura

Este trabalho é composto por vários capítulos, salientando-se sete, cujo conteúdo é detalhado nos próximos parágrafos. Seguidamente, no **capítulo 2 (Estado de arte)** é feita uma apresentação dos canais conformais sendo apresentadas características dos sistemas

mais comuns no arrefecimento de moldes, tal como a exposição de trabalhos relevantes realizados no domínio desta temática.

No **capítulo 3 (Metodologia de análise)** é apresentada a metodologia realizada ao longo desta dissertação, com base em todas as considerações previamente feitas no estado da arte.

No **capítulo 4 (Peça em estudo)** é descrita a peça plástica em estudo e também os vários elementos que participam no processo de moldação por injeção da mesma (material, molde, máquina de injeção, entre outros).

No **capítulo 5 (Análise numérica das várias configurações de arrefecimento)** são apresentados, em primeiro lugar, os casos de estudo que foram desenvolvidos, e em segundo todas as características gerais e particulares de cada um. Características dimensionais mas também associadas às necessidades inerentes do processo de simulação numérica.

No **capítulo 6 (Discussão de Resultados)** são expostos os resultados obtidos pela simulação numérica, como observações e comentários aos mesmos.

No **capítulo 7 (Caso de estudo otimizado)** é enunciado o caso de estudo otimizado resultante de todas as considerações realizadas no capítulo anterior. Consequentemente são indicadas todas as características deste estudo para a respetiva simulação, os resultados obtidos e a sua discussão. Ou seja, neste capítulo procede-se da mesma forma para o caso de estudo otimizado como feito para os restantes nos capítulos 4, 5 e 6.

Por fim, no **capítulo 8 (Conclusões)** são abordadas todas as conclusões retiradas do presente trabalho, permitindo assim também propor trabalhos futuros, no capítulo 9, para complementar e continuar a temática

2. Estado de Arte

2.1. Introdução

A Indústria de Moldes para matérias plásticas teve o seu início em 1943, na Marinha Grande, numa pequena empresa de moldes para vidro, por iniciativa de Aníbal H. Abrantes. Dois anos mais tarde produziu o primeiro molde de injeção para plástico. Neste seguimento, começaram a estabelecer-se outras empresas produtoras de moldes para plásticos, nas cidades da Marinha Grande e Oliveira de Azeméis, outro centro tradicional da indústria de vidro [2].

Atualmente, o setor de moldes possui 540 empresas, maioritariamente de pequena e média dimensão (PME), dedicadas à conceção, desenvolvimento e fabrico de moldes e ferramentas especiais. Portugal encontra-se entre os principais fabricantes de moldes a nível mundial, nomeadamente, na área da injeção de plásticos (8º no mundo, 3º na Europa), exportando mais de 85% da produção total [3].

O progresso e a vanguarda desta indústria deve-se, para além da sólida experiência e *Know-how*, ao rigoroso controlo de qualidade, à elevada experiência, à competitividade, ao investimento em alta tecnologia, fatores que asseguram a continuidade do fornecimento de moldes portugueses aos mercados mais exigentes no mundo [2].

2.2. Processo de moldação por injeção

O processo de moldação por injeção tem sido utilizado amplamente para a produção de produtos plásticos graças à sua elevada produtividade e versatilidade a um baixo custo [4-6]. Este pode ser dividido em 5 etapas distintas: plasticização, injeção, pressurização, arrefecimento, e finalmente a extração. O tempo decorrente desde a injeção do fundido na cavidade até à extração da peça final é o parâmetro mais significativo no cálculo do custo de produção de uma peça de plástico e é denominado de tempo de ciclo, conforme a **Figura 1**.

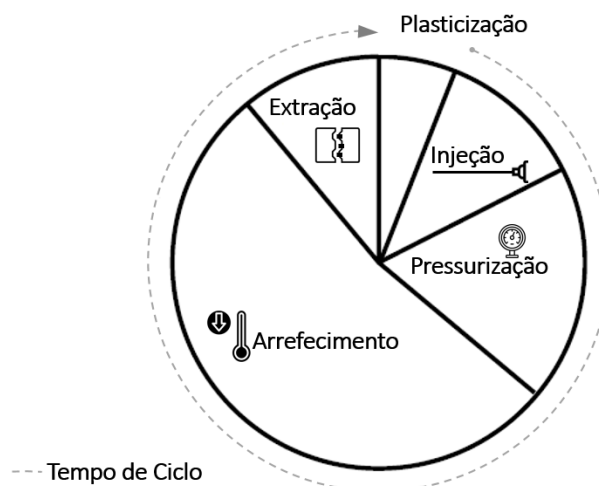


Figura 1 - Ciclo de moldação por injeção e etapas do tempo de ciclo – adaptada de [7]

O processo inicia-se com a introdução do polímero na tremonha da máquina de injeção, onde é depois transferido para o cilindro de plasticização para aquecimento.

Dentro deste está localizado um parafuso sem-fim (fuso) que à medida que roda permite a fusão progressiva do material, bem como o seu avanço progressivo até ser aplicado um movimento axial ao fuso que resulta na injeção do material através do bico da injetora para o molde, conforme a **Figura 2**. O material fundido flui desde o bico da injetora até à cavidade através do sistema de alimentação (constituído pelo jito, canais de alimentação e ataques).

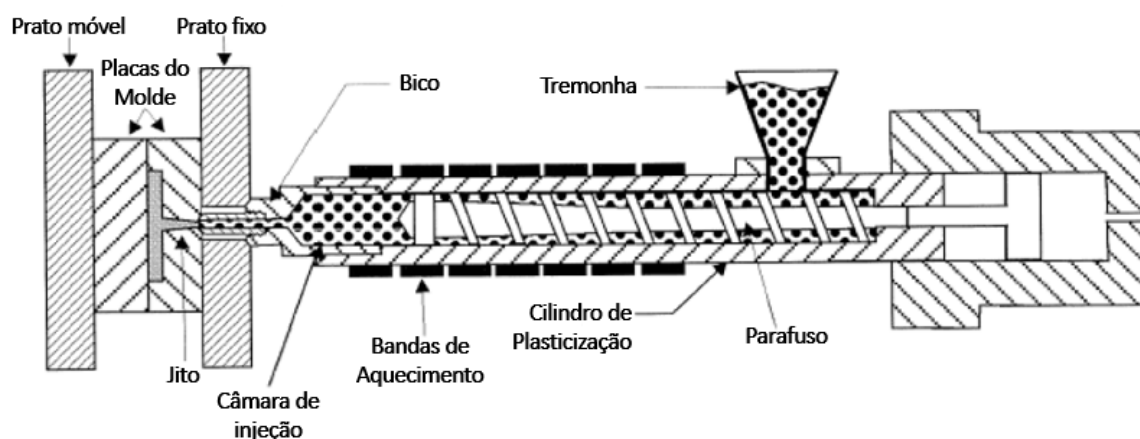


Figura 2 - Cilindro de Injeção e pormenor de molde - adaptada de [8]

A cavidade é o inverso da forma da peça a ser produzida. Assim que o fundido entra em contacto com a superfície do molde a uma temperatura inferior, começa a arrefecer e a camada solidificada superficial ganha forma. Isto resulta numa espessura do canal de fluxo menor e a camada solidificada na superfície da cavidade isola o material ainda fundido da parede do molde. Esta restrição de escoamento do plástico leva um aumento da resistência do fluxo e obriga a que a força necessária de ser aplicada pelo fuso seja cada vez maior.

Assim que a cavidade se encontra quase preenchida, ocorre a pressurização (ou pressão de manutenção ou pós-pressão), aplicada pelo fuso, que visa compensar a contração volumétrica, associada ao arrefecimento, forçando a entrada de mais plástico.

O sistema de alimentação termina no ataque, e assim que este solidifica, a entrada de plástico para a cavidade é bloqueada, dando-se início à etapa de arrefecimento. Assim que a peça esteja rígida o suficiente e atinga uma temperatura inferior à do seu ponto de solidificação, o molde abre e a peça é extraída do molde [9].

Um exemplo de um esquema de uma máquina de injeção encontra-se na **Figura 3** bem como as diferentes unidades que a constituem.

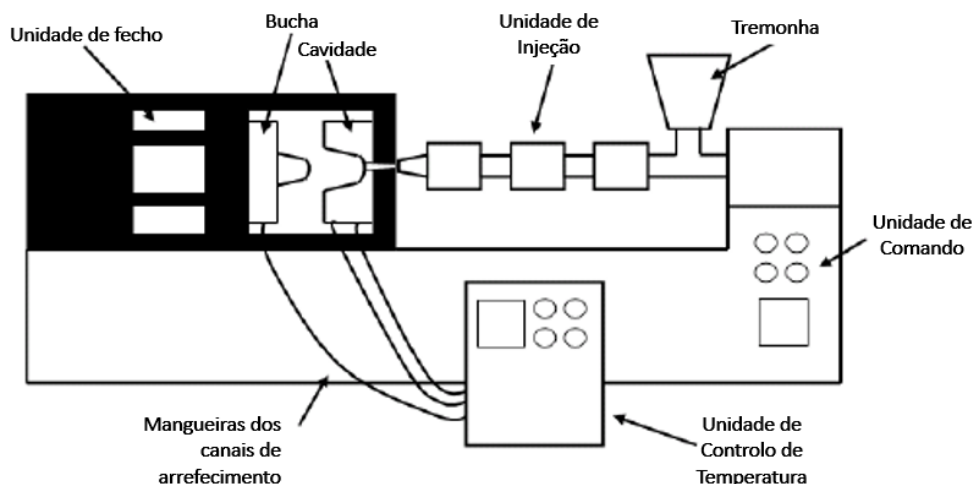


Figura 3 - Esquema de uma máquina de injeção e do sistema de controlo de temperatura - adaptada de [7]

2.3. Sistema de controlo de temperatura

Dimensões críticas, acabamento superficial, tempo de ciclo, (entre outros) são afetados pelo arrefecimento do molde. Consequentemente, é um fator decisivo para obtenção de um produto de boa qualidade e a um preço competitivo, uma vez que esta fase contribui com 70-80% do tempo de ciclo (ver **Figura 1**) [7, 10]. O molde tem que ser arrefecido, ou aquecido (relativamente à temperatura ambiente) com um sistema de permuta de calor, geralmente designado por sistema de controlo de temperatura de forma a extrair o excesso de calor gerado pelo polímero fundido.

O processo de arrefecimento inicia-se imediatamente após a injeção do polímero, no entanto, o tempo de arrefecimento é referido como o tempo desde a solidificação do ataque, após a pressurização, até à extração da peça, quando atinge uma temperatura inferior ao ponto de solidificação para suportar as forças de extração [7].

A transferência de calor ocorre maioritariamente durante a fase de injeção uma vez que a diferença de temperatura é elevada, isto é, a diferença de temperatura entre o fundido e a superfície da cavidade do molde é máxima. Na pressurização, mais material fundido é forçado para o interior do molde e por consequência, ser-lhe-á transmitido mais calor após a injeção, que também terá que ser removido.

Devido à contração volumétrica, é criada uma camada de ar entre a parede da cavidade e a peça, pelo que a transferência de calor para o molde também reduz significativamente [11].

O calor fornecido pelo polímero ao molde é extraído através da circulação do fluido arrefecedor (convecção forçada), transferido para as placas de fixação (condução) e para o ambiente envolvente (convecção e radiação) (**Figura 4**). No entanto, as perdas de calor através das superfícies exteriores do molde na realidade representam menos de 5%, podendo estas faces serem consideradas adiabáticas. Desta forma, podem ser desprezadas as transferências de calor para o ambiente envolvente e o balanço energético procede-se

devido ao fluido arrefecedor (comummente água ou óleo) que circula no molde pelos respetivos canais [12, 13].

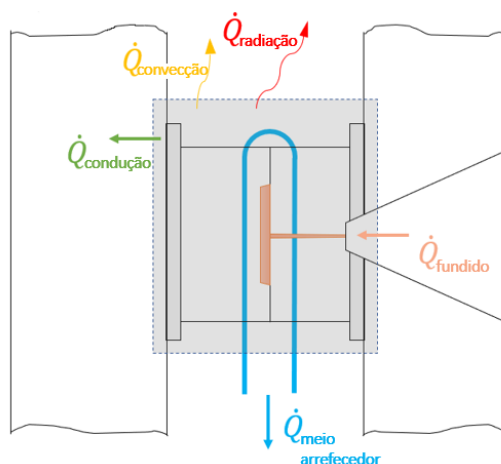


Figura 4 - Balanço Térmico do molde – adaptada de [14]

Estes canais têm um vasto leque de configurações e por isso o processo de seleção tem de ser ponderado segundo critérios a estudar para cada situação em particular, tendo em atenção as vantagens e desvantagens de cada um. Seguidamente faz-se um levantamento de algumas destas configurações.

2.3.1. Canais ligados em paralelo, em série e as suas variantes

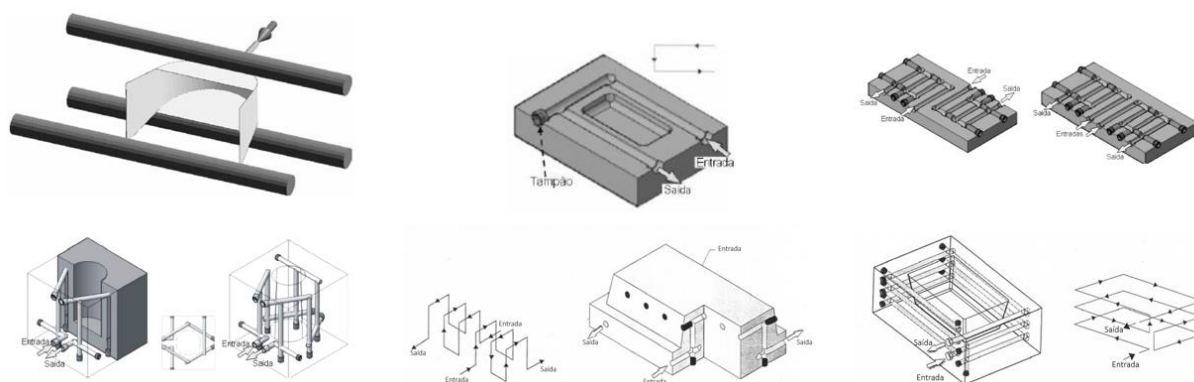


Figura 5 - Circuitos de refrigeração ligados em paralelo, em série e algumas variantes - adaptada de [14, 15]

Estes canais são retos, lisos e perfurados nas placas do molde com recurso a processos convencionais (maquinação e furação). No entanto, existem muitas variantes deste sistema,

como a aplicação de insertos do mesmo material do molde ou com materiais de alta condutividade térmica (como liga cobre-níquel) de forma a aumentar a transferência de calor. No caso de geometrias mais complexas, a maquinação e furação são mais elaboradas recorrendo às tecnologias mais avançadas, como é o caso do canal helicoidal. Estes processos são acompanhados de uma série de acessórios para que se possa obter o resultado pretendido (ver **Figura 5**) [9, 14].

2.3.2. Lâmina separadora (palheta)

A aplicação de uma lâmina separadora (ou como referido na literatura anglo saxónica de *Baffle*) é maioritariamente utilizada para a refrigeração de buchas, conseguindo-se a compatibilização entre o sistema de controlo de temperatura e o sistema de extração. Também pode, no entanto, ser aplicada para cavidades (ver **Figura 6**).

Este método permite aumentar a área de escoamento de fluido, no entanto é muito difícil de colocar a lâmina exatamente no meio do furo e o arrefecimento difere em cada lado da lâmina devido ao aquecimento gradual do fluido no canal. Uma alternativa a este *design* é aplicar uma deformação à lâmina de forma a obter uma configuração em espiral para garantir uma distribuição de temperatura mais uniforme graças ao aumento de eficiência de extração de calor por aumento da turbulência induzida [9, 14].

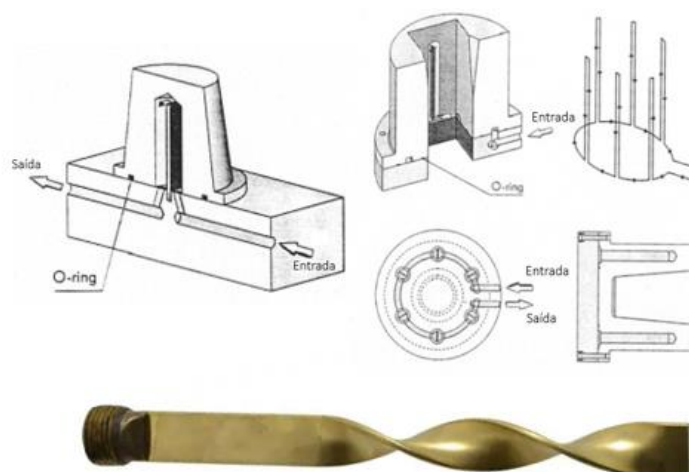


Figura 6 - Circuito com lâmina separadora de uma bucha (esquerda) e de uma cavidade (direita) e lâmina separadora em espiral – adaptada de [14]

2.3.3. Cascata com núcleo de refrigeração

Outra alternativa à lâmina separadora é a utilização de um circuito em cascata com núcleo de refrigeração, também designado por sistema borbulhante (ou como referido na literatura anglo saxónica de *Bubbler*). À semelhança do caso posterior, pode ser aplicado tanto para buchas como para cavidades.

O fluido é conduzido desde a entrada do canal até ao fundo da bucha por um tubo, mantendo-se constante a resistência do fluxo em todas as secções transversais, ou seja, o fluido entra através de um tubo e seguidamente “escorre” pelas paredes, saindo pelo canal respetivo. Em alternativa, para buchas estreitas de grande profundidade podem ser utilizados os núcleos de refrigeração helicoidal. O fluido passa através de um tubo central e é conduzido por uma espiral até à sua circunferência e desde o seu interior pelo inserto helicoidal até à saída (ver **Figura 7**) [9, 14].

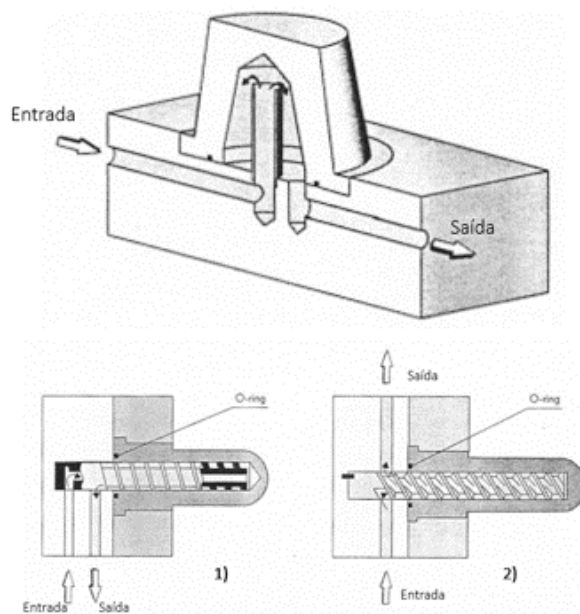


Figura 7 - Circuito em cascata com núcleo de refrigeração (sistema borbulhante) e núcleo de refrigeração helicoidal: 1) Helicoidal simples 2) Helicoidal dupla – adaptada de [14]

2.3.4. Pinos térmicos

Esta é uma solução interessante no caso das dimensões interiores da peça serem mais reduzidas. Estes pinos que se encontram no mercado numa variada gama de diâmetros e comprimentos, são simplesmente tubos cujo interior tem um fluido e pequenos canais capilares. Este fluido ao entrar em contacto com uma fonte de calor numa extremidade vaporiza e desloca-se para a extremidade oposta que está em mergulhada numa fonte fria (fluido arrefecedor). O fluido dissipa este calor e condensa, voltando por capilaridade, para a outra extremidade mais quente onde volta a vaporizar e assim sucessivamente (ver **Figura 8**).

A grande vantagem é estes pinos ter uma eficiência muito mais elevada que a água, no entanto não podem ser cortados (para ajustar a altura) e devem ter um quarto do seu comprimento em contacto com a fonte fria, o que condiciona o dimensionamento do molde.

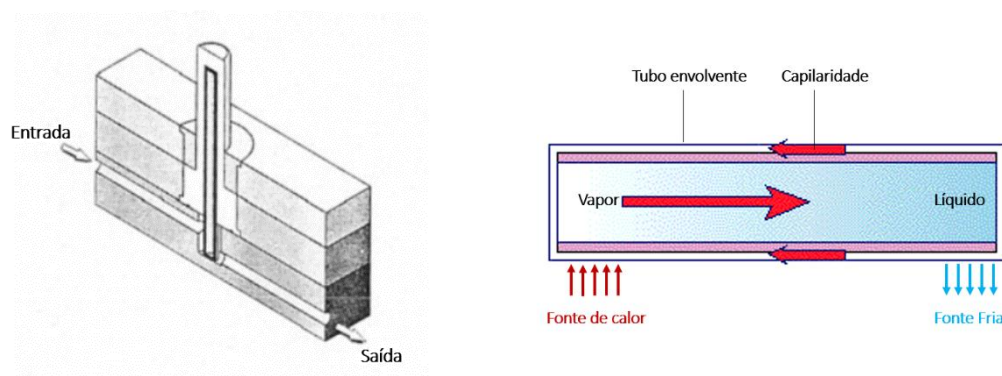


Figura 8 – Pino térmico em secção com linha de água (esquerda) e representação do princípio do seu funcionamento (direita) – adaptada de [14, 16]

2.3.5. Insertos/Postiços de diferentes materiais

Esta estratégia tem o principal objetivo de aumentar a transferência de calor com materiais cuja condutividade térmica seja maior que a do molde, como ligas de cobre ou de alumínio. Esta condutividade mais elevada permite a redução de zonas de elevada concentração de calor uma vez que tendencialmente reduz as diferenças de temperatura ao longo da cavidade [17].

Estes insertos são normalmente fixados por pressão e o arrefecimento é promovido através do contato direto ou indireto com a peça até à onde existe a fonte fria, como o fluido de arrefecimento [18].

No caso de peças de dimensões mais pequenas, é possível utilizar apenas materiais alternativos aos utilizados normalmente, como as ligas de cobre, para o seu arrefecimento, não necessitando de sistema de arrefecimento [14].

Apesar de todas as vantagens, estas apenas se verificam se a cavidade e a bucha forem constituídas de materiais diferentes, ou seja, se ambos tiverem o mesmo material de elevada condutividade, as distribuições de temperatura não são tão uniformes como o contrário. Paralelamente, outra desvantagem é a maior suscetibilidade ao desgaste [17].

2.3.6. Canais conformais

Com vista a melhorar a extração de calor foi criado um sistema de refrigeração cuja distância da peça fosse constante, substituindo um sistema normalizado por um sistema de refrigeração realizado em exclusivo para a peça em questão por meios de fabrico diferentes dos convencionais (ver **Figura 9**). Estes meios são incapazes de produzir canais complexos balanceados num espaço tridimensional. Salvo algumas possíveis aproximações (para *layouts simples*) com recurso a maquinagem CNC (*Computer Numerical Control*) e eletroerosão (cantos e geometrias pequenas e complexas) que têm dificuldades de concretização associadas.

Uma mais ampla aceitação dos canais conformais pela indústria dos moldes deve-se, sobretudo, aos avanços no desenvolvimento das tecnologias de prototipagem rápida.

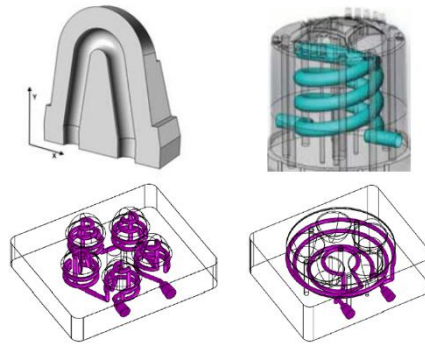


Figura 9 - Aplicações de canais conformais em buchas e cavidades - adaptada de [19-21]

2.3.6.1. Processos de fabrico

O fabrico rápido de ferramentas (*rapid tooling* - RT) em aço de alta qualidade é algo cada vez mais presente na indústria atual. No entanto, esta indústria está em expansivo crescimento e a sua aplicabilidade está a evoluir constantemente. São várias as tecnologias que permitem a produção de insertos (ou postigos) para ferramentas de moldação por injeção. Menges et al. [9] sugere uma classificação de RT da seguinte forma:

- processos de remoção e revestimento convencionais;
- processos aditivos;
- processos por modelos mestre (*master*);
- processos híbridos;

Em 2015 o comité ISO/TC 261 em cooperação com o comité da ASTM F42 (*American Society for Testing and Materials*) foi responsável por criar a ISO/ASTM 52900:2015 que formula um conjunto de diretivas que classificam a gama de processos aditivos em sete categorias. As sete categorias referenciadas na ISO/ASTM 52900:2015, que substitui a ASTM F2792:2012 são [22, 23] :

- **Directed Energy Deposition** (Deposição direta de energia);
- **Power Bed Fusion** (Fusão em camada de pó);
- **Binder Jetting** (Impressão 3D de Aglomerante);
- **Material Extrusion** (Deposição de material fundido);
- **VAT Photopolymerisation** (Fotopolimerização);
- **Sheet Lamination** (Laminação de folhas);
- **Material Jetting** (Impressão 3D por Jato de material);

Destas sete categorias apresentadas, o processamento de metais pode ser conseguido por cinco. As tecnologias utilizadas no processamento, os materiais normalmente utilizados e os respetivos fabricantes são apresentados na **Tabela 1**.

Tabela 1 - Processos aditivos para o processamento de metais – adaptada de [24, 25]

Categorias	Processos	Materiais	Fabricantes
Impressão 3D de Aglomerante	Metal 3D Print	Aço inoxidável	ExOne
Deposição de Material fundido	FDM	Feedstocks	-
Deposição direta de energia	LENS DMD	Aço inoxidável Aço ferramenta Liga crómio-cobalto Ligas de titânio Ligas de níquel	Optomec POM Group Trumpf GmbH
Laminação de Folhas	UAM	Ligas de alumínio Ligas de cobre Aço inoxidável Ligas de titânio	Fabrisonic
Fusão em cama de pó	SLM	Aço inoxidável Aço ferramenta Ligas de alumínio Ligas de titânio Liga de crómio-cobalto Liga de níquel	3D Systems Concept Laser EOS GmH SLM Solutions GmbH Renishaw Realizer GmbH Sisma Group OGGI 3D
	EBM	Liga de titânio Liga de crómio-cobalto	Arcam EB

Impressão 3D de aglomerante

O processo de jato de aglomerante utiliza dois materiais, o pó e uma resina aglomerante. O material de construção é o pó e o aglomerante atua como um adesivo entre as várias camadas de pó da peça. A cabeça de impressão, deposita seletivamente o aglomerante nas secções da peça, sobre uma camada de pó metálico e o processo repete-se sucessivamente, até se obter a geometria pretendida (confrontar **Figura 10**). O pó solto permanece na plataforma para dar suporte à peça durante a fase de fabrico. A geometria que se retira da plataforma do processo não é final, sendo necessário remover o

aglomerante e proceder à sinterização do pó metálico. De seguida, a infiltração com um metal para melhorar as propriedades mecânicas, a durabilidade e o acabamento [24-26].

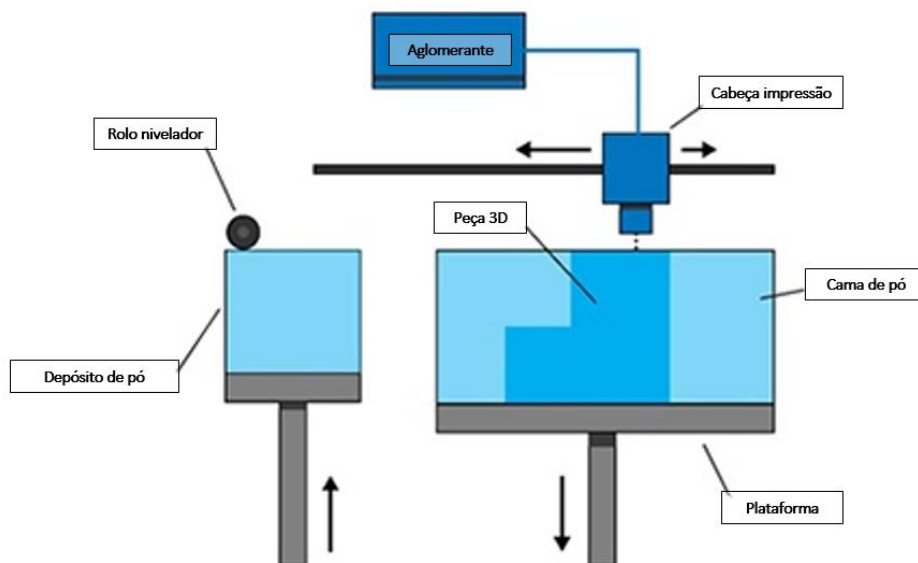


Figura 10 – Princípio de funcionamento da Impressão 3D de aglomerante – adaptada de [25]

Deposição de material fundido

A deposição de metais (FDMe - *Fused Deposition of metals*) é uma técnica desenvolvida para produzir componentes metálicos, com base na extrusão de misturas de metal com um ligante polimérico (*feedstocks*) para formar camada a camada objetos tridimensionais. A mistura deve conter um teor de pó metálico considerável para evitar a contração excessiva nos tratamentos térmicos, bem como a remoção do ligante e a sinterização, sem comprometer as propriedades reológicas adequadas durante o processo de extrusão [24, 27].

O equipamento de deposição de material fundido consiste numa extrusora de parafuso único vertical, como na **Figura 11**. O aquecimento do tambor é assegurado por dois aquecedores de banda. A peça é construída sobre uma mesa impulsionada por motores de passo para controlar trajetórias (em X e Y) e a deposição de material. O movimento descendente ao longo do eixo Z necessário para as camadas seguintes também é acionado por um motor passo a passo de modo a serem possíveis camadas de espessuras diferentes. Todo o processo, desde as temperaturas a todo o movimento da plataforma são controlados por um computador [24].

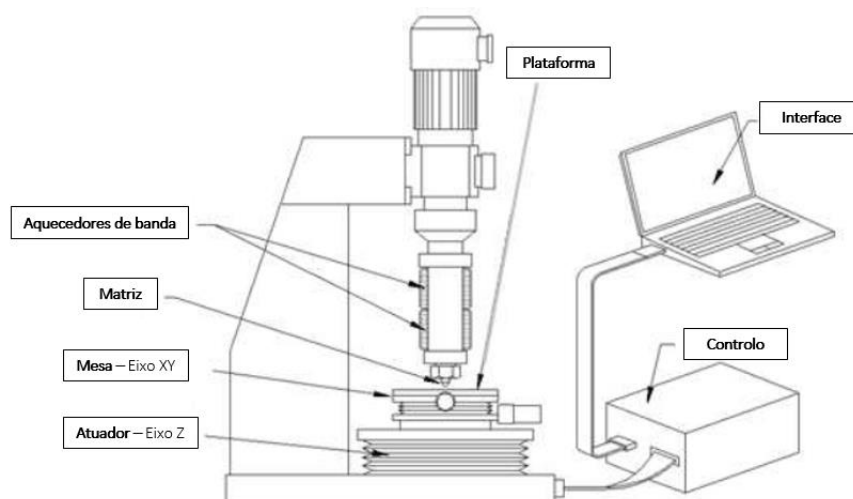


Figura 11 – Princípio de funcionamento FDMe – adaptada de [24]

Fusão em cama de pó

A fusão em cama de pó (*Powder Bed Fusion*) é um processo de fabrico aditivo que utiliza um pó metálico que é processado por um ou vários lasers de potência considerável, fazendo com que exista uma fusão total deste material durante a fase de construção do componente. No início é depositada uma fina camada de pó sobre a área de trabalho, e um laser faz o varrimento da superfície fazendo a sinterização das zonas em que incide, permanecendo as zonas envolventes em pó. Após a sinterização de cada camada, a plataforma de trabalho desce e é depositada uma nova camada de pó, reiniciando-se o processo de sinterização de uma nova camada (ver **Figura 12**). Neste processo não são necessárias estruturas adicionais de suporte da peça durante o fabrico uma vez que o pó solto envolve o modelo e permite a sua sustentação [24, 26]. A conjugação de parâmetros como a potência do laser, as propriedades mecânicas do material e a velocidade de varrimento do feixe de laser na camada depositada faz com que seja possível atingir uma densidade relativa próxima dos 100 % [1, 24, 28].

Neste processo estão incluídas as seguintes técnicas para materiais metálicos: sinterização direta de metal a laser (*Direct Metal Laser Sintering* - DMLS), fusão por feixe de eletrões (*Electron Beam Melting* – EBM) e fusão seletiva a laser (*Selective Laser Melting* - SLM).

Todos estes métodos de fusão em cama de pó utilizam ou um laser ou um feixe de eletrões para fundir e unir material sob a forma de pó e têm cada um as suas especificidades. O SLM requer o uso de um gás inerte e tem associada uma baixa eficiência energética. O DMLS é utilizado apenas para materiais metálicos com uma vasta gama incluindo os de engenharia [25].

Relativamente ao EBM, este apresenta-se como sendo um dos processos com maior capacidade de produção de peças metálicas densas com elevada resistência mecânica, conseguida devido à temperatura uniforme durante a fusão. A elevada qualidade e o seu

acabamento adequam-no à produção de peças para a indústria aeronáutica e aplicações médicas. Este processo utiliza assim um feixe de eletrões, obtido pelo aquecimento de um filamento de tungsténio a altas temperaturas, sendo a fonte energética responsável pela fusão total dos pós metálicos, permitindo uma eficiência energética de 90%.

A atmosfera de trabalho, em vácuo, potencia um ambiente livre de oxigénio, assegurando a pureza do material utilizado, garantindo a precisão do feixe de eletrões, uma vez que não existe contato com partículas presentes no ar, bem como um bom isolamento térmico [24, 25, 28].

A introdução de gás (hélio ou árgon) durante o processo evita a acumulação de carga elétrica nos pós metálicos, e permite uma maior velocidade de arrefecimento, após finalizada a produção. A facilidade de obter diferentes potências caloríficas faz com que este possibilite a construção de componentes numa vasta gama de materiais[24, 25, 28].

Os principais constituintes de um equipamento EBM são apresentados na **Figura 13**, sendo o principal a coluna de eletrões. O filamento de tungsténio aquecido emite eletrões que são acelerados até uma energia cinética de, aproximadamente, 60 keV. Este feixe é controlado por dois anéis de bobinas eletromagnéticas: o primeiro é uma lente magnética que é responsável pela focalização do feixe até ao diâmetro desejado e o segundo é responsável pela deflexão do feixe para a coordenada pretendida. A coluna de eletrões é fixa, não existindo qualquer movimento mecânico da sua parte durante a construção de um componente. A corrente do feixe varia, de forma controlada, entre 1 a 50 mA, e o seu diâmetro pode ser focado até valores de 0,1 mm. A espessura da camada depositada pode variar entre 0,05 a 0,2 mm sendo que esta sofre aquecimento duas vezes: a primeira passagem, a uma velocidade muito elevada, serve para aquecer os pós metálicos, e a segunda, a uma velocidade inferior, para garantir a sua total fusão e união. Este método pertence à *Arcam*, e é denominado por *Multibeam*. Esta estratégia de fusão é possível devido à eletrónica de deflexão de última geração, que permite otimizar simultaneamente o acabamento da superfície, a precisão e a velocidade de construção [24, 25, 29].

A precisão dimensional obtida por estes processos pode ser melhorada com acabamentos posteriores através de maquinaria.

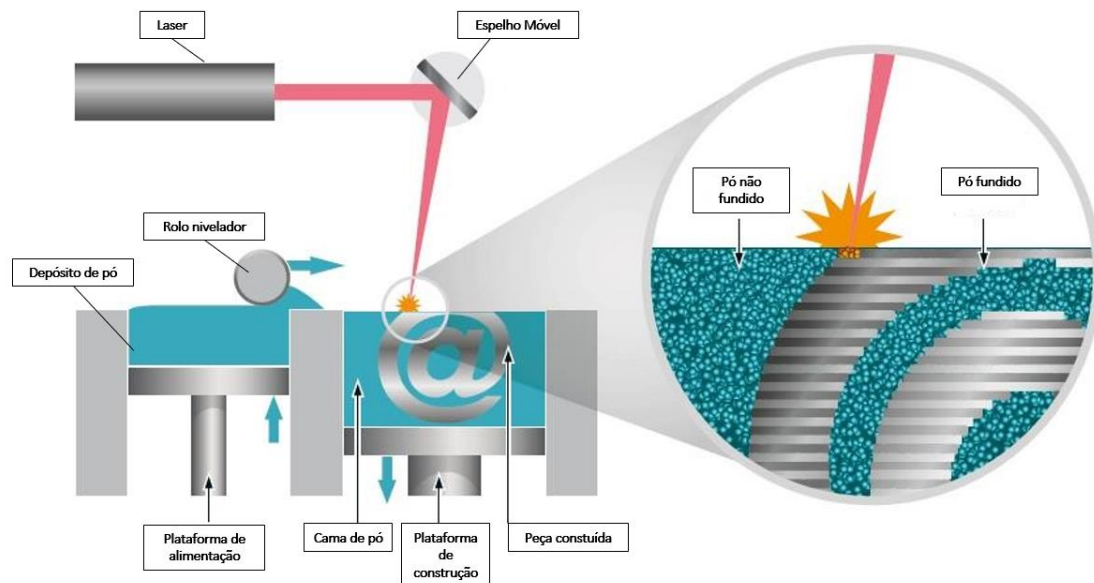


Figura 12 – Princípio do funcionamento de fusão em cama de pó (SLM) – adaptada de [30]

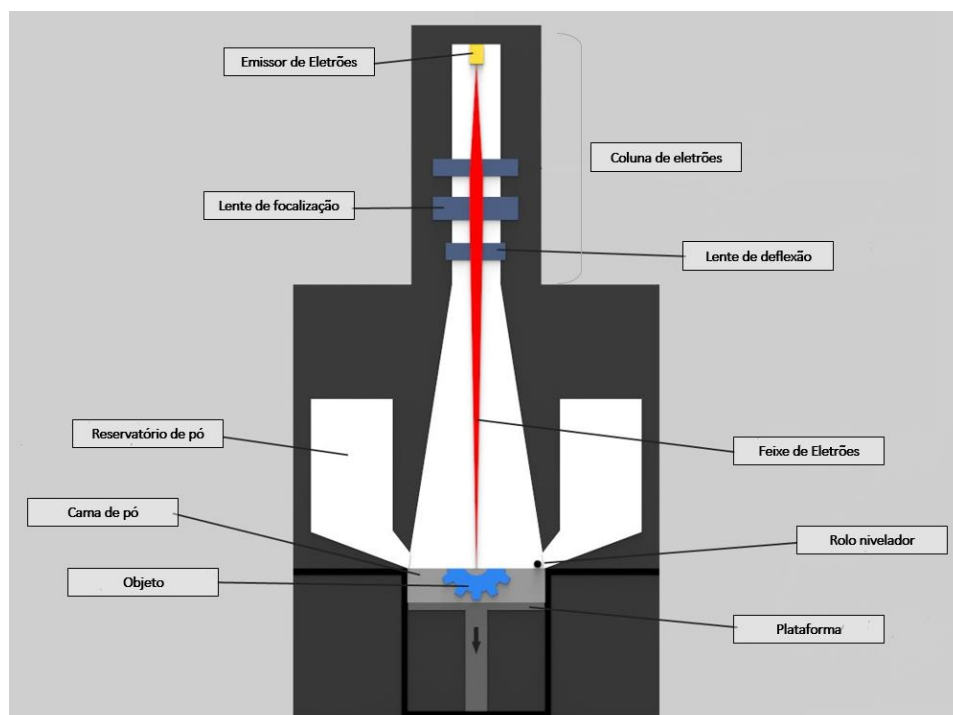


Figura 13 - Princípio de funcionamento de EBM – adaptada de [31]

Deposição direta de energia

O processo de deposição direta de energia possui algumas similaridades com o processo SLM, na capacidade de produzir protótipos de metal de elevada densidade, com boas propriedades metalúrgicas e velocidades razoáveis de construção. No processo são aplicadas camadas muito finas e sucessivas de metal, até a peça estar formada. As partículas metálicas são inseridas através de um feixe laser focalizado de alta potência, que funde as partículas de metal sobre um substrato. O substrato é movido sob o feixe laser por meio de uma mesa (com movimentos no plano XY), podendo possuir outros graus de liberdade de rotação, permitindo a construção de peças de qualquer geometria e formato. O processo ocorre num ambiente controlado, com baixa presença de oxigênio, para não ocorrer a oxidação das camadas de metal depositadas [24, 26].

Podem ser usados metais diversos, sob a forma de pó ou fio, tais como aço inoxidável e ligas de níquel, cobre, alumínio ou titânio. A potência do gerador de raio laser varia conforme o material utilizado, a taxa de deposição, entre outros parâmetros. No entanto, os protótipos produzidos requerem maquinação para um acabamento posterior dada a baixa precisão dimensional. Apresentam uma boa microestrutura e propriedades similares ao metal convencional [24-26].

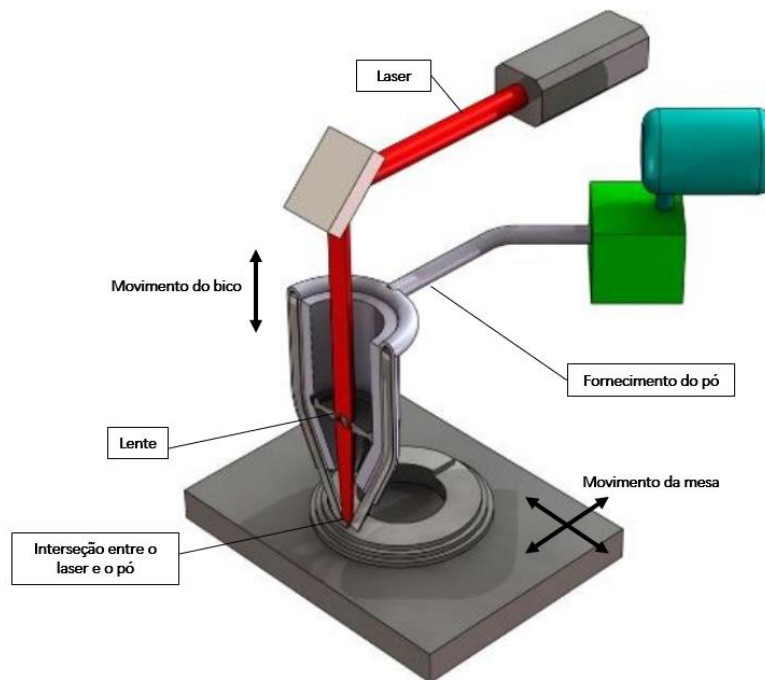


Figura 14 - Princípio do funcionamento da deposição direta de energia – adaptada de [26]

Laminação de Folhas

Apesar da tecnologia de laminação de folhas (ver **Figura 15**) ser um processo associado à utilização de papel, esta categoria também inclui a *Ultrasonic Additive Manufacturing*

(UAM), que utiliza folhas de metal ou faixas metálicas que são aglomeradas por soldadura ultrassônica. A laminação de folhas utiliza uma aproximação a este processo camada a camada, no entanto utiliza um adesivo ao invés da soldadura mencionada [25].

Este processo requer maquinaria CNC complementar para remover o material não consolidado no processo, podendo esta ser efetuada camada a camada ou no final. O facto de ser um processo de baixas temperaturas permite criar geometrias internas e também unir diferentes materiais com uma quantidade de energia relativamente baixa. Todas estas vantagens resultam de o material metálico não requerer fusão, sendo aglomerado camada a camada por uma combinação de pressão e frequência ultrassônica [25].

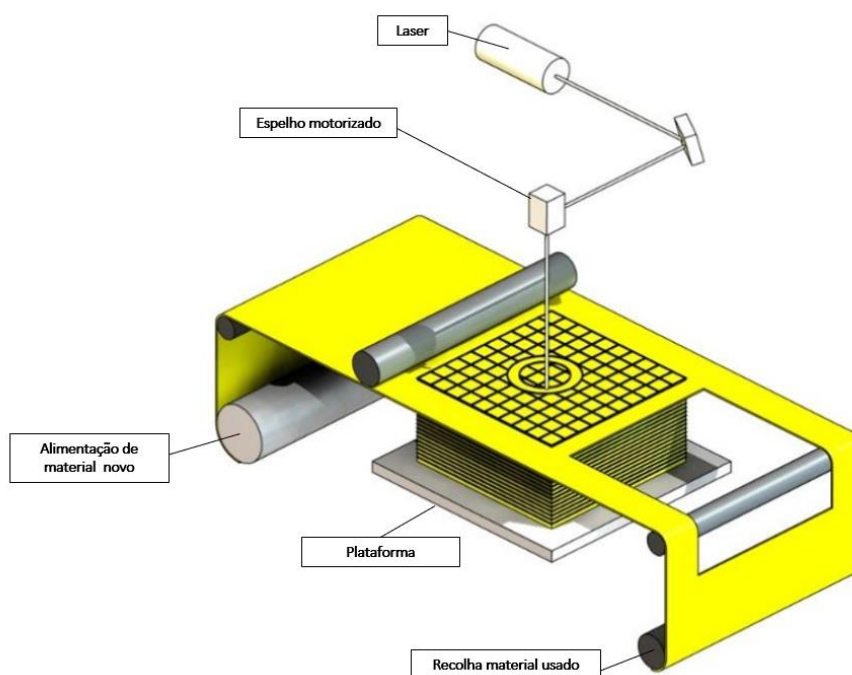


Figura 15 – Princípio do funcionamento da Laminação por folhas (LOM) – adaptada de [26]

Nesta temática, ainda que todas elas possam ser aplicadas na indústria de fabrico de moldes, as que cumprem melhor esta finalidade é a tecnologia de fusão em camada de pó, mais especificamente a fusão seletiva por laser, SLM, e a deposição direta de energia [24].

2.4. Atuais sistemas de controlo de temperatura

Neste capítulo serão analisadas as diferentes soluções de arrefecimento referidas na literatura. Uma vez que o ciclo de moldação é muito dependente do tempo de arrefecimento, influenciando, assim, a qualidade da peça e a cadência de produção, ou seja, a relação custo-benefício depende sobretudo desta etapa [32].

Desta forma, muitos investigadores tentaram otimizar o sistema de refrigeração convencional, mas a limitação imposta pela tecnologia de produção de moldes obrigava ao

design simples dos canais retos [33]. A utilização de lâminas separadoras, sistemas borbulhantes e pinos térmicos permitiram uma alternativa no arrefecimento de pequenas regiões afastadas dos canais. No entanto, estas soluções não são eficazes ou mesmo passíveis de serem implementadas em alguns casos, como peças com formas complexas de média/grande dimensão e restrições associadas ao sistema de extração e planos de separação [19, 34, 35].

Assim, de forma a contornar este problema, os investigadores introduziram os canais conformais com o objetivo do fluido de arrefecimento acompanhar a forma do produto/peça. A distância entre o canal de arrefecimento e a cavidade moldante é constante, logo a distribuição de temperatura é mais uniforme. O *design* destes canais no molde de injeção está inteiramente relacionado com a qualidade da peça, pois, tendo por objetivo a diminuição dos defeitos como pontos quentes (hot spots), rechupes, contrações diferenciais, tensões térmicas residuais e empeno. Estes defeitos podem ser minimizados com um sistema de arrefecimento mais eficiente que assegura a uniformidade na distribuição da temperatura nos insertos e no molde [32].

É de salientar que existem várias estratégias na otimização de um sistema de controlo de temperatura. O sistema pode ser elaborado através de regras e cálculos pré-estabelecidos ou até mesmo, estudos realizados por outros autores e com recurso a simulação computacional ou experimentalmente, testando a sua viabilidade em comparação com outras tipologias de sistemas de controlo de temperatura.

Procede-se a um estudo paramétrico das várias tipologias dos canais conformais de forma a verificar qual ou quais as melhores alternativas para o caso em estudo. Esta pode ainda ser complementada com um estudo experimental, levando para um contexto prático o estudo em questão. Existem uma série de situações que apenas podem ser avaliadas neste domínio, uma vez que, os pressupostos teóricos nem sempre se verificam.

Outra possibilidade é o desenvolvimento de um sistema de controlo de temperatura por recurso a otimização (métodos analíticos, DOE - *Design of Experiments*, etc.) que, dependendo do objetivo, pode ser implementada de variadas formas com vista a se obterem os resultados ótimos de uma série de variáveis, neste caso, associadas ao processo de transferência de calor no processo de injeção. Após este sistema estar otimizado, os resultados da sua aplicação numa peça podem ser obtidos, pela sua aplicação em ambiente de simulação CAE (*Computer Aided Design*, por exemplo, *MoldFlow*®) ou pelos resultados intermédios do algoritmo utilizado para a otimização. Isto porque, durante este último, os valores ótimos resultantes partiram de condições pré-determinadas a estes. Por essa razão, uma forma de avaliar o rigor da aproximação realizada pelo algoritmo é através da comparação entre os resultados intermédios deste (que deram origem ao sistema otimizado) e os obtidos numa simulação numérica.

Relativamente a sistemas de canais conformais, existem dois tipos de configurações, em paralelo e em série. Ambas são apresentadas no estudo realizado por Sabrina Marques et al. [20] e uma geometria respetiva de cada uma é comparada a uma configuração de canais convencionais (circuito em “U”).

Os canais conformais em série são conectados num circuito fechado desde a entrada de fluido até à sua saída, permitindo que se o seu tamanho permanecer uniforme, o fluido consegue manter o escoamento turbulento em todo o seu comprimento (ver **Figura 16**). Isto possibilita que o calor seja transferido com uma maior eficácia. Ainda assim, este tipo

de configuração não deve ser utilizada se o comprimento do circuito necessitar de uma potência de bombagem superior à suportada pela bomba e se os constrangimentos físicos do *design* do molde não permitirem um arrefecimento eficaz deste circuito.

Já nos canais conformais em paralelo, o canal de entrada ramifica-se em vários canais que seguem a geometria pretendida e convergem num só canal de saída, ou seja, o fluído circula de uma entrada múltipla para uma saída múltipla (ver **Figura 16**). Devido às características destes canais, o fluxo varia dependendo na resistência de cada canal individual, o que significa que a transferência de calor vai também diferir. Para se obter uma extração de calor uniforme é necessário que este circuito seja balanceado, só devendo ser utilizado se a queda de pressão num circuito em série for demasiado elevada para ser realista e se não puder ser aplicado o circuito em série para um arrefecimento eficaz.

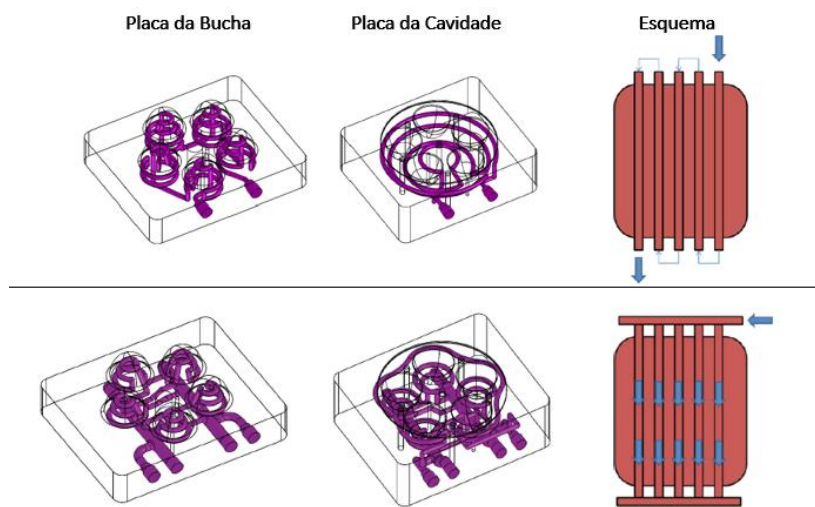


Figura 16 - Exemplo da aplicação canais conformais em série (em cima) e em paralelo (em baixo) – adaptada de [20]

Perante uma geometria do molde em cujo objetivo seja um arrefecimento conformal, o desenho deste tipo de canais pode ser complexo e não tem regras para a sua elaboração, pelo que Xu et al. [33] apresentou uma aproximação modular sistemática para facilitar este processo, fornecendo uma solução global pela adição de várias soluções locais. Devido ao arrefecimento ser local na superfície da ferramenta, esta é dividida em regiões geométricas e um sistema de canais é desenhado para cada uma. Cada sistema é modelado como um elemento integrante do sistema de arrefecimento, tipicamente numa região abrangida por dois canais.

Foram aplicados critérios incluindo a condições de transferência de calor, considerações de queda de pressão e de temperatura pelo canal bem como da dureza do molde.

A **Figura 17** ilustra esta estratégia pelo uso de uma parte genérica com uma cúpula hemisférica de base plana. Conforme demonstrado, a peça é primeiramente dividida em duas zonas de arrefecimento (a superfície hemisférica e a plana) com base na sua geometria. A seguir, para cada zona de arrefecimento, é construída a superfície de arrefecimento

conformal e a estrutura topológica do canal de arrefecimento é definida. Após isto, o sistema de canais de arrefecimento é decomposto adicionalmente em pequenos elementos chamados células de arrefecimento. A análise de transferência de calor e o desenho do sistema de arrefecimento é baseado nestas células e é depois mapeado para o molde inteiro. Esta estratégia de design modularizado não é sensível à geometria da peça, pelo que mantém a mesma simplicidade independentemente da complexidade geométrica.

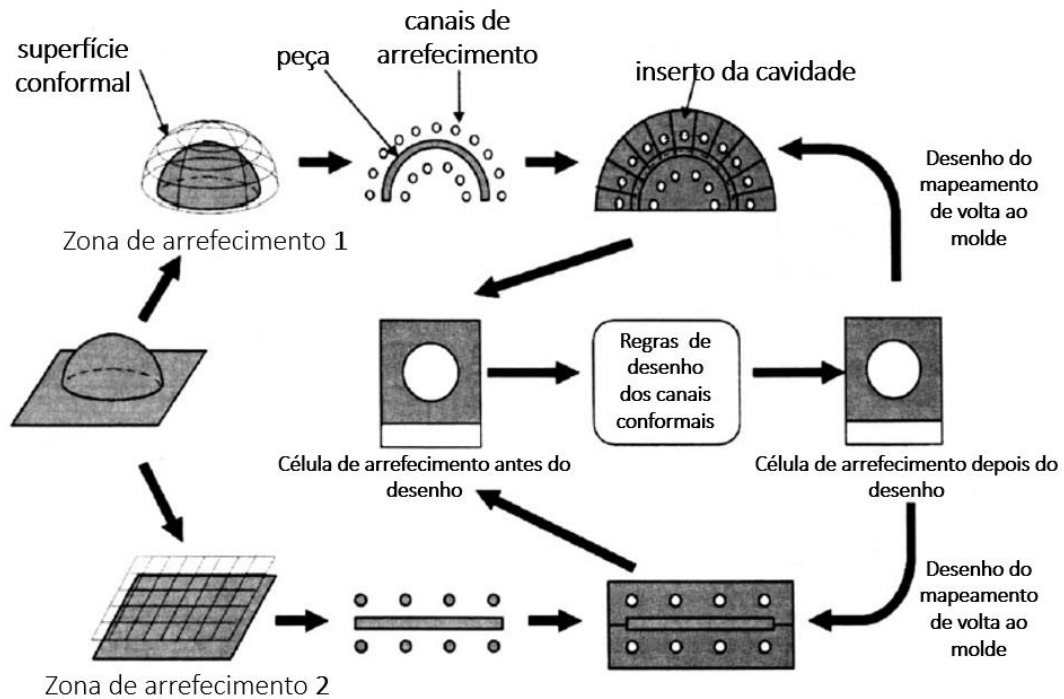


Figura 17 - Etapas na modularização do desenho das linhas de arrefecimento - adaptada de [33]

2.5. Metodologia para aplicação de um sistema de controlo de temperatura por canais conformais

A utilização de canais conformais num sistema de controlo de temperatura de uma cavidade moldante pode ter por base uma série de critérios. Após selecionar alguns critérios considerados relevantes para a indústria de moldes, como: tipo de peça/fator económico/peça técnica/tempo de ciclo, realizou-se uma pesquisa na literatura de forma a analisar cada um destes critérios.

2.5.1. Tipo de Peça

A constante evolução tecnológica permite obter peças cada vez mais complexas e com um nível de detalhe cada vez maior. Peças complexas, devido à sua geometria e à dificuldade

de extração de calor, necessitam de um sistema de arrefecimento eficaz e que não provoque defeitos. Rännar et al. [7] realizaram vários estudos no qual o empeno de uma peça com uma bucha estreita é reduzido quando o sistema de arrefecimento é constituído por canais conformais. Esta redução verificou-se tanto a nível numérico como experimental, demonstrando uma redução mais proeminente no numérico [15, 36]. A redução atinge os 37% se forem aplicadas condições ótimas de processamento. Isto num estudo numérico dos mesmos autores (com recurso a DOE), no qual a temperatura do fundido, da bucha, da cavidade e o tempo de arrefecimento têm que ser tidas em consideração, para que os benefícios da utilização desta nova tecnologia sejam totalmente aproveitados [37].

A uniformidade da temperatura da cavidade moldante é essencial para uma extração de calor eficaz bem como para ausência de defeitos, como já mencionado. Assim, a utilização de canais conformais ao invés dos canais convencionais permite atingir valores inferiores de temperatura máxima na superfície da bucha, o que se correlaciona com uma maior uniformidade. Estes valores variam mais consideravelmente quanto maior for a dificuldade de extração de calor da peça.

Ou seja, a homogeneidade da distribuição térmica é superior com a utilização de canais conformais, atingindo-se diferenças de temperatura máximas de 4°C [19], relativamente a canais convencionais esta diferença é de 10-40°C se as peças possuírem geometrias mais complexas e de espessura reduzida [38-40].

Zink et al. [11] também obtiveram melhores valores de transferência de calor com a utilização de canais conformais relativamente aos convencionais devido ao estreitamento do diâmetro que permite ao fluxo atingir uma maior velocidade. A ausência de regiões no qual existe fluído estagnado também contribui para esta melhoria. No entanto, este estudo demonstrou, que se forem utilizados insertos com configuração de arrefecimento tradicional (em “U”), mas num material com elevada condutividade térmica (como *Ampcoloy 940*®) os resultados são melhores que os obtidos com a geometria conformal, no entanto esta diferença não é significativa comparativamente à baixa resistência mecânica da liga durante um processo exigente como o de moldação. Este resultado poderá não se replicar para geometrias mais complexas pois têm regiões de difícil extração de calor, que exigem um arrefecimento mais localizado. Algo que os canais conformais conseguem garantir através da sua geometria adaptada a essas regiões e da distância constante à peça

Patel et al. [41] e Pali et al. [42] também realizaram estudos sobre a influência dos canais conformais numa bucha e cavidade de uma peça de polipropileno alta cuja temperatura de superfície reduziu em mais de 36% relativamente a outros métodos de arrefecimento, tendo-se observado uma menor contração, como existência de rechupes.

Reis et al. [43] conclui que a utilização de canais conformais melhorou consideravelmente a moldação de uma peça de geometria bastante complexa (caixa com muitas divisões, próximas com detalhe e extração requer 107 pinos injetores) tanto no estudo numérico como no experimental realizado.

2.5.2. Peça Técnica/Peça Comum

No caso de uma peça técnica, esta vem acompanhada de uma série de requisitos específicos, cujo incumprimento invalida a sua utilidade. Este tipo de peças para além de tolerâncias mais restritas têm devido à sua especificidade e exigência um custo também

superior. Assim, contrariamente a uma peça comum, este tipo de peça exige moldes mais complexos bem como meios tecnológicos e humanos para a sua moldação, pelo que a rejeição de peças deve ser minimizada. Este critério apesar de em alguns pontos se poder enquadrar com o anterior, abrange peças simples com uma exigência dimensional elevada.

Assim e conforme já explicado anteriormente, o sistema de canais conformais implica um sistema de canais que envolvem a peça na superfície da cavidade moldante, mas o arrefecimento conformal tem um significado adicional, relacionado com a transferência de calor em regime transiente no molde.

Quando o processo de moldação é iniciado, o molde demora algum tempo até atingir uma temperatura estacionária operante. A **Figura 18** mostra o histórico da temperatura da superfície do molde registada por termopares no molde com canais de arrefecimento paralelos e com canais conformais.

Conforme se pode verificar, a temperatura da superfície da bucha com canais paralelos requereu cerca de 25 injeções sucessivas, variando de uma temperatura inicial de 12°C até atingir a temperatura média estável do ciclo de aproximadamente 55°C. No entanto, se as linhas de água forem colocadas muito próximas e com a forma da superfície do molde, esta condição de estado estacionário é atingida muito rapidamente, conforme se pode ver na **Figura 18**, na qual a temperatura média de ciclo é atingida ao fim de um ciclo de injeção. Para além disso, a variação entre a temperatura máxima e mínima do molde é inferior no caso dos canais conformais.

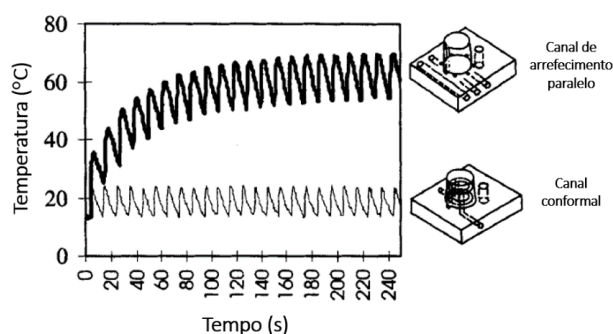


Figura 18 - Comparação entre a evolução da temperatura da superfície do molde nos canais paralelos e conformais – adaptada de [33]

Assim, a definição operacional de arrefecimento conformal segundo Xu et al. [33] é a temperatura média do ciclo atingir um estado de equilíbrio num ciclo de injeção [33].

Voltando à questão da moldação de peças técnicas, as características dos canais conformais descrita anteriormente permite concluir que sendo necessários menos ciclos para que se atinja uma temperatura estável, menos peças serão rejeitadas pelos defeitos associados a uma não uniformidade de arrefecimento como contrações volumétricas, contrações diferenciais (devido às diferentes distribuições de temperatura pela espessura da peça e em algumas áreas da mesma ou efeitos de orientação) que, por sua vez, provocam um menor empeno. Esses defeitos comprometem a exigência dimensional requerida para a peça e, no caso de se tratar de um propósito de conjunto, podem comprometer a montagem.

Park et al. [44] procederam à otimização de vários sistemas de refrigeração, utilizando uma combinação de métodos analíticos, DOE e o método das diferenças finitas. A simulação em Moldflow® foi utilizada com vista à comparação dos resultados obtidos pelo algoritmo utilizado para otimizar um sistema de arrefecimento, sendo os valores obtidos próximos, com um esforço computacional muito inferior, sendo uma abordagem interessante nesse sentido.

O sistema de refrigeração em análise faz uso de lâminas separadoras, mas estas acompanham a superfície da cavidade moldante por uma distância constante, podendo ser considerado como canais conformais. Numa peça de revestimento/cobertura em plástico com dimensões médias o arrefecimento com esta matriz de lâminas separadoras é notoriamente melhor que o obtido com recurso aos canais retos normais (configuração em “Z”). Num segundo caso de estudo, uma grelha de um automóvel com dimensões já consideráveis (caixa delimitadora do molde 676x173x120 mm), o resultado foi igual ao anterior, uma vez que a matriz proporcionou uma distribuição de temperatura mais uniforme. No entanto, a queda de pressão é muito superior quando comparada com a dos outros canais, o que obriga a uma maior potência de bombagem [44].

Noutro estudo realizado pelos mesmos autores foram otimizados os canais conformais envolvidos na moldação de um para-lamas automóvel (caixa delimitadora com dimensões 348x235x115 mm e com 2,5mm de espessura) no qual a simulação por *MoldFlow*® do sistema otimizado revelou que o intervalo entre a temperatura mínima e máxima é sempre inferior quando comparado com o não otimizado. Em respeito ao empeno, o mesmo foi reduzido em 15,7% relativamente a canais retos paralelos [45].

Estes exemplos permitem aferir que neste critério (para além de outros) a indústria automóvel tem uma componente muito forte.

Reis et al [43] também simulou a distribuição de temperatura numa peça complexa. A diferença de temperatura das paredes interiores para a exterior atinge os 59,35 °C com a utilização de canais convencionais e um inserto de alta condutividade, enquanto no inserto com canais conformais, a diferença máxima atingida nas diversas áreas analisadas da peça é 10,6°C.

2.5.3. Fator Económico

A produção destes canais requer tecnologia aditiva, que apesar de estar a evoluir e a ficar mais acessível, continua ainda com um elevado custo para uma grande maioria das empresas que não têm tanto poder de investimento. O custo associado aos meios técnicos, energéticos, humanos e das matérias-primas requer um investimento elevado, faz com que as empresas não estejam dispostas a correr o risco sem que exista fundamentação experimental, acabando por tomar uma postura apreensiva.

Zink et al. [11] provou melhorias significativas com a utilização dos canais obtidos por tecnologia aditiva, no entanto, estes canais obtidos por DMLS de aço Maraging MS1, devido à sua elevada rugosidade, ficaram danificados por corrosão muito mais rapidamente que os restantes sistemas em estudo, o que a longo prazo prejudica a integridade do molde.

Park et al. [44] utilizou uma abordagem diferente da tecnologia aditiva uma vez que o sistema de refrigeração em análise faz uso de lâminas separadoras (**Figura 19**) que se situam a distância constante da cavidade moldante, podendo ser considerado canais conformais.

Este tipo de canais foi utilizado em virtude dos canais conformais produzidos com recurso a prototipagem rápida inferirem um arrefecimento mais uniforme, no entanto, as tecnologias de produção associadas representam um custo elevado em moldes de dimensão média-grande. Este sistema permitiu um ainda menor custo na fabricação do molde, visto que nos processos de otimização elaborados pelos autores, para além dos objetivos característicos de um sistema de arrefecimento, (obtenção de uma distribuição de temperatura uniforme e minimização do tempo de arrefecimento) existe ainda o de redução do custo do molde. Esta redução é baseada na redução do número de lâminas maquinadas no material do molde. Apesar de se tratar de uma aproximação ao sistema conformal, a sua utilização melhorou consideravelmente o tempo e a distribuição de temperaturas nas duas peças analisadas, pelo que ganha uma dimensão interessante.

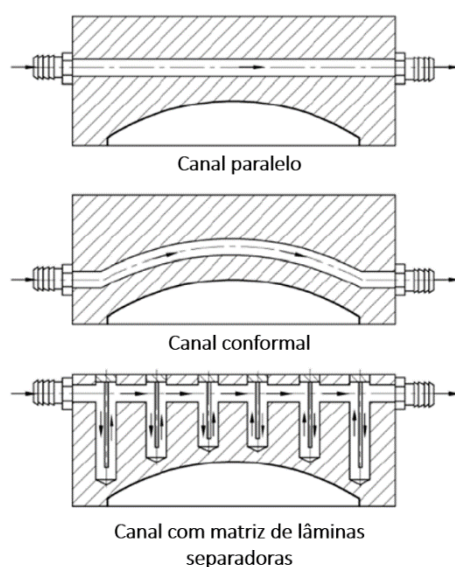


Figura 19 - Comparação entre tipologias de canais de arrefecimento pela sua secção longitudinal – adaptada de [44]

Vários autores também realizaram estudos neste sentido. São aplicadas aproximações ao sistema de arrefecimento conformal, que fazem uso de entalhes/canais fresados entre duas metades maquinadas que após serem seladas, criam a cavidade, e pelo mesmo método a bucha. As motivações para esta abordagem é sobretudo o custo do processo de fabrico aditivo, a sua durabilidade inferior, o tamanho do molde e o rigor no toleranciamento.

Saifullah et al. [46] testaram um molde obtido com recurso a maquinagem, no qual estudaram experimentalmente a utilização de canais conformais. Foi possível uma redução de 35% no tempo de arrefecimento e 20% no tempo de ciclo de uma amostra de 2 plásticos diferentes, PP (Polipropileno) e ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno), comprovando-se os estudos numéricos realizados com 2 peças pelos mesmos autores.

Minh et al. [47] também comparou os resultados obtidos num estudo numérico e experimental na temperatura de uma bucha com canais conformais helicoidais no seu interior. Esta bucha, que também foi obtida por maquinagem, permitiu concluir que quanto

mais voltas têm o canal helicoidal, melhor a distribuição de temperatura na superfície do molde (uma diferença de apenas 2,5°C).

Dang et al. [34] também utilizaram esta estrutura composta do molde (ver **Figura 20**), no estudo do sistema de arrefecimento do para-lamas automóvel (mencionado em 2.5.2), mas apenas de uma forma numérica pois o estudo experimental não foi realizado.

Sun et al. [48] adotaram este método na simulação de uma peça plástica de uso doméstico, tendo atingido uma redução do tempo de arrefecimento em 54% relativamente a um sistema convencional (canais paralelos e lâminas separadoras).

Ainda que estes dois últimos artigos tenham peças minimamente complexas, os autores apenas deram relevância à simulação com esta arquitetura do molde, não realizando qualquer estudo experimental. Assim e ainda que se trate de estruturas de difícil *design*, produção e montagem, segundo os mesmos autores, estas compensam devido aos aspetos já mencionados.

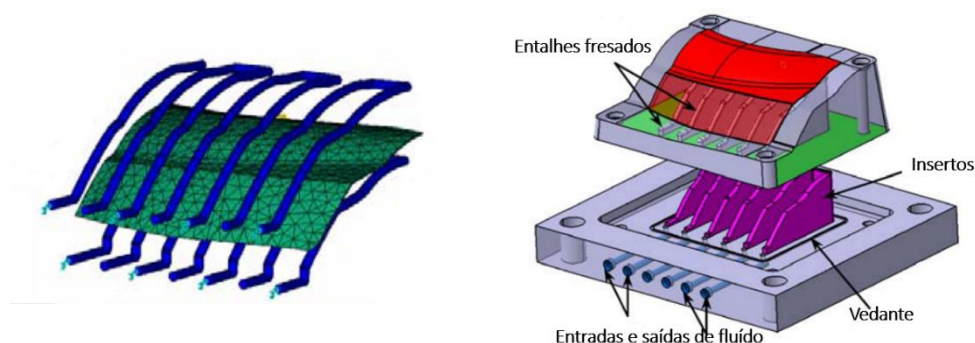


Figura 20 – Peça com canais conformais em Moldflow® (esquerda) e bucha com os mesmos canais obtidos por fresagem (direita) – adaptada de [34]

Wimpenny et al. [39] realizaram um estudo sobre a produção de moldes por LOM para peças cujo arrefecimento é efetuado com recurso a canais conformais. Além da performance melhorada do ponto de vista da uniformidade térmica no molde para uma peça automóvel, o custo e tempo estimado para a produção da ferramenta laminada foi cerca de 14230€ e 3 semanas, respetivamente. Correspondendo assim a uma redução no custo e no tempo de respetivamente, 54% e 33%, comparativamente com a maquinação em aço convencional. Apesar da ressalva à utilização desta tecnologia no sentido de estar mais indicada para moldes maiores, a sua aplicação quando utilizada eficazmente foi demonstrada como sendo um sucesso técnico e económico.

Ilyas et al. [49] procederam a uma série de estudos para demonstrar que insertos produzidos por SLS indireto permitem garantir especificidades necessárias (sistema conformal, etc.), durabilidade e requisitos específicos (dureza, toleranciamento, acabamento superficial, etc.). Os ganhos na produtividade atingiram os 59% e a poupança de energia os 20%, no entanto, num dos casos em estudo não existiu qualquer benefício nestes parâmetros uma vez que a complexidade da peça ou a sua dimensão não era elevada. Assim os autores consideram que nos casos em que efetivamente houve uma melhoria, o

custo inicial acabaria por ser vantajoso economicamente se o volume de produção fosse consideravelmente muito elevado. Não obstante, o custo da produção da ferramenta moldante é marginal quando colocado ao lado dos custos de funcionamento a longo prazo e a melhoria produtiva. Ainda é realçado que apesar dos insertos terem uma durabilidade inferior ao volume de produção sugerido, mesmo com a substituição dos mesmos, acaba-se por ter uma produção mais económica.

No entanto, também se salvaguarda a dificuldade de extrapolação dos casos em estudo neste artigo para a criação de uma regra geral de aplicabilidade. Dificuldades devido ao desgaste da ferramenta estar dependente do material a ser injetado e da geometria da cavidade e da bucha. Todavia, fica claro que para uma ampla gama de aplicações de moldação, esta abordagem proporciona uma solução mais económica.

Reis et al. [43] realizou um estudo no qual os custos associados à produção e acabamentos da ferramenta moldante por SLM são cerca de 4 a 5 vezes superiores aos associados à ferramenta moldante convencional. Ainda que o tempo de execução de ambos tenha sido muito diferente, os autores asseguram que estes custos podem ser otimizados. Outra questão, também abordada, prende-se com uma considerável poupança energética, que para além do impacto financeiro, tem implicações interessantes em questões como o fabrico sustentável.

2.5.4. Tempo de Ciclo/Cadência de produção

O tempo de ciclo é o critério onde os resultados são mais notáveis com a introdução de canais conformais no sistema de controlo de temperatura de um molde. Conforme já foi referido anteriormente, o tempo de ciclo está muito dependente do tempo de arrefecimento, assim, pela redução no tempo de arrefecimento é inferido um aumento da cadência de produção.

Relativamente a este tópico, Rännar et al. [36] realizaram um estudo numérico em que o tempo de ciclo diminui em 67% e 60% para uma igual ou melhor estabilidade dimensional relativamente aos canais paralelos e à lâmina separadora, respetivamente. Patil et al. [42] com recurso a *Autodesk Moldflow Insight*®, exploraram vários tipos de geometrias de refrigeração e, conforme o estudo anterior, a utilização de canais conformais tanto na bucha como na cavidade permitiram uma redução de 49.6% no tempo de arrefecimento comparativamente com os convencionais (circuito em “Z” na placa da cavidade e da bucha) e de 12% quando comparado com canais conformais na cavidade e lâminas separadoras na bucha.

Um estudo sobre a influência da secção transversal dos canais conformais no tempo de ciclo foi levado por Altaf et al. [50, 51] num estudo numérico e experimental. Estes canais, cuja secção transversal difere da circular para se adaptar ao perfil da cavidade, podem ser designados por canais conformais perfilados. Este conceito permite melhorias significativas no campo da moldação por injeção. Do estudo numérico com recurso ao ANSYS® permitiu concluir que o incremento de 14,6% no fluxo de calor pela utilização destes canais reduziu o tempo de ciclo. No estudo experimental, por outro lado, a redução de tempo de ciclo foi quantificada em 18%, resultante do aumento da velocidade e dissipação do calor, não tendo sido perceptível qualquer mudança na qualidade da peça.

Jahan et al. [52] estudaram a otimização da topologia de moldes para a indústria de moldação por injeção, mais especificamente, a otimização do design dos canais de arrefecimento conformais. Com recurso a ANSYS® e a DOE, otimizou-se um molde de canais convencionais para a moldação de uma tampa cilíndrica de plástico, especificamente em parâmetros como o diâmetro do canal, distância entre canais e a distância do canal ao molde. Uma vez que esta geometria é cilíndrica, os canais formam uma espécie de espiral (a distância constante) em torno da peça, tendo importância a secção transversal do canal que também foi analisada neste processo de otimização. Os resultados permitiram concluir que os parâmetros mencionados acima, quando otimizados, permitem uma redução no tempo de arrefecimento em 55%, e em caso de modificação da secção transversal circular para retangular, a redução é de 64%. Esta última provou ser a mais eficiente, pois o lado de maior comprimento da mesma é paralelo ao corpo da peça, sendo o melhor perfil para seguir a cavidade.

Noutro estudo realizado pelos mesmo autores, com recurso aos mesmos métodos e a mesma peça, mas neste o tempo de arrefecimento e a tensão máxima de *von-Mises* foram analisados [53]. Desta vez, o design foi otimizado para minimizar o tempo de arrefecimento sem comprometer a estabilidade estrutural no molde, conseguindo-se uma redução do tempo de arrefecimento em 50% comparativamente com os canais convencionais. Porém, numa análise subsequente relativamente às propriedades dos materiais utilizados no caso anterior, ou seja, baseando-se na solução de design encontrada, estudou-se a variação no tempo de arrefecimento e da tensão para um molde constituído com o aço comumente utilizado para a produção de moldes comparativamente com um molde obtido com recurso a tecnologia aditiva (neste caso, DMLS). Esta verificação é importante, para que se perceba o impacto da utilização de material impresso tridimensionalmente ao utilizado normalmente. Os resultados permitiram concluir que apesar do valor da tensão não variar, o valor do tempo de arrefecimento aumentou em 42%. Este valor é justificado pelo valor da condutividade térmica do aço (resultante do processo aditivo considerado), que é inferior ao normal devido às moléculas não estarem tão compactas como no aço sólido. A existência de uma maior quantidade de ar reduz a condutividade muito consideravelmente. Ainda assim, os valores utilizados dependem muito do processo utilizado para a produção do molde, pelo que a sua seleção necessita de ser ponderada segundo os resultados pretendidos.

Sabrina Marques et al. [20] já referenciada anteriormente levou a cabo uma simulação em *Moldflow*® provando que a configuração conformal em série foi a melhor opção no arrefecimento da peça plástica composta por 5 cavidades. Esta conseguiu uma redução expressiva nas deformações, apesar da redução do tempo de ciclo ter ficado muito aquém das expectativas, com apenas 6% de redução comparativamente aos canais normais. Este resultado pode ser explicado pelo facto de a peça não ter um elevado grau de complexidade (por ter cavidades pouco profundas) ou pelo canal de alimentação ser extraído juntamente com a peça. Assim, é também essencial ter em consideração o sistema de alimentação.

Num estudo experimental e numérico, Reis et al. [43] conseguiram reduzir 49,3% o tempo de arrefecimento e 34,2% o tempo de ciclo pela utilização de insertos com canais conformais obtidos por SLM relativamente a insertos de alta condutividade térmica (*Ampcoloy 83*®) com canais convencionais. Para além desta análise comparativa, foi

realizada outra na qual um objetivo produtivo de um milhão de peças era obtido com a solução conformal cerca de 150 dias (de 24h cada) antes da solução convencional analisada.

Shayfull et al. [32] referenciam o sistema de aquecimento para moldação por injeção (referida na literatura anglo-saxónica como *Rapid Heat Cycle Molding* - RHCM). Neste processo, a superfície da cavidade moldante é aquecida previamente à injeção de forma a que as peças resultantes do processo tenham um melhor acabamento superficial, ausência de linhas de soldadura e bolhas de ar. Apesar das vantagens associadas, o excesso de calor fornecido à cavidade moldante comparativamente ao processo convencional origina um tempo de ciclo muito elevado devido ao tempo de arrefecimento se tornar muito elevado. Neste artigo de revisão, foi feita uma análise do aquecimento e arrefecimento do molde em separado. Pelo que apenas se comprova que o aquecimento do molde com recurso a canais conformais (com circulação de vapor sobressaturado) é superior comparativamente com canais lisos, mas o arrefecimento do mesmo não foi tido em atenção [32, 54]. No entanto os autores demonstram a necessidade de investigação na utilização dos canais conformais no processo de RHCM, uma vez que a conjugação destes dois tópicos nunca tinha sido analisada. Nesse sentido, Kitayama et al. [55] num artigo da mesma temática, estudaram o aquecimento e arrefecimento com recurso a canais conformais na moldação de uma peça. Este processo é conseguido através do fluxo de água a uma temperatura elevada durante a fase de aquecimento da cavidade moldante e posteriormente, na fase de arrefecimento, o fluxo de água é alterado para uma temperatura inferior (em cerca de 70°C) à anterior. Os resultados numéricos e experimentais comprovaram melhorias na qualidade da peça (pela redução da linha de soldadura), um incremento na produtividade (pela redução do tempo de ciclo) mas também um aquecimento e arrefecimento uniforme.

Assim, trata-se de uma aplicação na qual a implementação de um sistema de arrefecimento de grande eficiência traz uma série de vantagens, proporcionando um excelente potencial para esta tecnologia de canais conformais.

Com os quatro critérios anteriormente apresentados (tipo de peça, peça técnica/comum, fator económico e tempo de ciclo/cadência de produção) tem-se uma melhor perceção das vantagens, desvantagens e das limitações de sistemas de moldação com canais conformais. Porém, apesar dos artigos mencionarem uma série de conclusões com base nos estudos realizados, estas não devem ser tomadas nem como uma constante e nem como um caso isolado uma vez que são muito influenciados pelas condições de cada caso em específico. É necessário ter em consideração as condições de processamento: a temperatura do fundido, da bucha e da cavidade e o tempo de arrefecimento. Estes fatores têm de ser tidos em atenção para que os benefícios da utilização dos canais conformais sejam aproveitados [7, 41]. Relativamente à variação da temperatura e da velocidade do fluido que circula nas diversos *layouts*, esta não influenciou os resultados significativamente [11, 56].

Conclua-se que apesar de ser uma tecnologia em constante desenvolvimento, cabe aos seus investigadores de utilizarem modelos o mais próximo possível do real de forma a que as empresas do sector tomem uma posição mais assertiva em vez da apreensiva. Semelhantemente a uma série de inovações na indústria de moldes, que numa fase mais inicial não tiveram tanta adesão, como é o caso dos canais quentes, também os canais conformais tendem a seguir o mesmo percurso.

(Esta página foi intencionalmente deixada em branco)

3. Metodologia de Análise

Assim, para avaliar o desempenho desta tecnologia face ao apresentado anteriormente pela análise da literatura, foi criada uma metodologia para avaliar as repercussões no controlo de temperatura de uma peça através da aplicação de variados sistemas para o atingir. A avaliação passa essencialmente por 4 etapas (conforme a **Figura 21**):

1. Implementação de arquiteturas de controlo de temperatura;
2. Análise comparativa entre os resultados obtidos;
3. Avaliação da implementação com base nas conclusões obtidas dos resultados;
4. Com base nestas conclusões e avaliações é desenvolvida uma arquitetura otimizada;

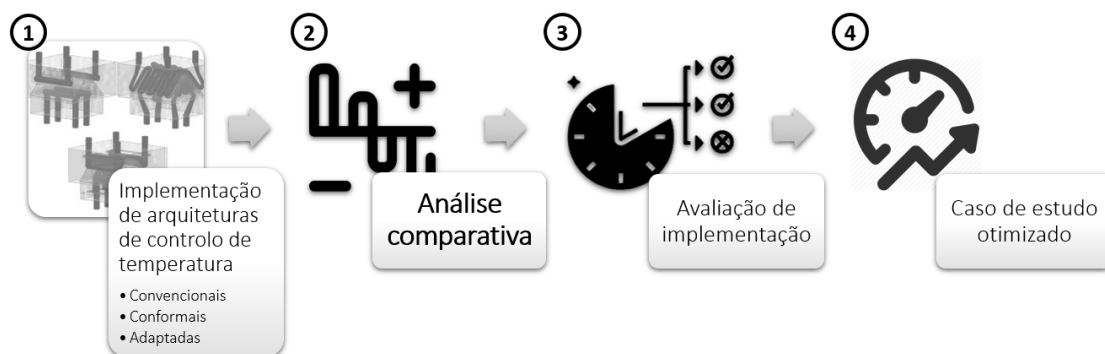


Figura 21 - Etapas do estudo – adaptada de [11]

Com base em tudo o que foi acima referido, os canais conformais constituem uma mais valia, ainda que dependendo da peça e de todo um conjunto de condições, essa vantagem possa ser mais ou menos significativa. Deste modo, para analisar essa influência, foi criado um caso de estudo bem como várias arquiteturas de arrefecimento, em que uma delas é com recurso a canais conformais. O objetivo prende-se com o estudo destes canais e outros sistemas tradicionalmente utilizados com a finalidade de otimizar o sistema de controlo de temperatura do caso de estudo.

O processo de evolução dos resultados à medida que se progride nas diferentes arquiteturas permite uma comparação particular e ao mesmo tempo global. Isto é, para além de se analisar o tempo de arrefecimento (por exemplo) e como varia para cada geometria, esse mesmo tempo é comparado pelas várias geometrias.

Por fim, é desenvolvido o caso de estudo otimizado, resultante de todas as conclusões e avaliações anteriores. Neste caso de estudo, no qual será aplicada a tecnologia de canais conformais, vai procura-se solucionar todas as problemáticas que foram encontradas com os casos de estudo anteriores.

Observe-se que o ideal seria aliar o método computacional ao experimental de forma a permitir uma comparação e validação dos resultados. Porém, apenas foi passível de ser

utilizado o método computacional devido, essencialmente, a constrangimentos de tempo e financeiros. As simulações numéricas são amplamente utilizadas no geral dos trabalhos académicos e de investigação, ainda mais nesta área, pelo se utilizou esta abordagem, salvaguardando sempre os pressupostos teóricos que a caracterizam.

Todo o estudo do ponto de vista numérico e de simulação foi executado em AMI® (*Autodesk Moldflow Insight*®) tendo toda a modelação prévia sido realizada com AIP® (*Autodesk Inventor Professional*®), modelação como a peça, o molde, o inserto e as várias geometrias de canais.

A peça que será apresentada de seguida, foi escolhida tendo em conta aspetos geométricos inerentes a uma extração de calor complexa, garantindo ao mesmo tempo simplicidade, uma vez que se trata de uma primeira aproximação ao programa de simulação.

4. Peça em estudo

A peça em estudo durante a dissertação será apresentada de seguida. Para além desta, será apresentado o material selecionado para a mesma, o sistema de alimentação e outros elementos associados ao seu processo de moldação como o molde, a máquina de injeção, etc.

4.1. Peça

A peça em análise consiste num copo delgado, transparente. A peça, embora não sendo um produto técnico, detém requisitos funcionais no que concerne cumprimento de cotas críticas, na longitudinal e transversal, ditados, essencialmente, pelas condicionantes estéticas a nível de empeno e transparência. Apresenta-se a peça em estudo na **Figura 22**.



Figura 22 – Peça em estudo [57]

4.2. Material

Tendo em conta os requisitos globais do produto atrás mencionados, procedeu-se à seleção do material adequado. Assim, selecionaram-se os dois materiais passíveis de mais facilmente conferir transparência, nomeadamente PC (polycarbonato) e o PMMA (Polimetacrilato de Metilo, acrílico), conhecidos como termoplásticos de engenharia pelas suas características termomecânicas. Deste modo, procedeu-se à análise das propriedades dos materiais que se consideraram pertinentes no âmbito deste estudo e da aplicação em causa, tendo-se, para o efeito, elaborado a **Tabela 2**.

Tabela 2 - Comparação entre as características entre o PC e o PMMA [58-60]

PC		PMMA
790,0	Resistência Impacto (Izod c/entalhe a 23°C) [J/m]	320,0
60,7	Resistência à Tração [MPa]	62,1
2410,0	Módulo de Elasticidade [MPa]	3100,0
115,0	Alongamento [%]	6,0
88,0	Transmissão de Luz [%]	92,0
2,70 – 2,82	Preço [€/kg]	2,77 – 2,89

O policarbonato tem uma resistência ao impacto muito elevada comparativamente com o PMMA. Os valores da referência utilizada mostram uma resistência duas vezes superior no caso do teste de impacto Izod. Relativamente à resistência à tração, os valores são semelhantes, embora o valor mais elevado esteja associado ao PMMA [59].

Se por um lado o PMMA é mais rígido (maior módulo de elasticidade), tem uma maior facilidade de quebra/fissura sob tensão, resultando também do menor alongamento permissível. Relativamente a outros aspetos, como é o caso da transparência, os acrílicos permitem uma transparência maior que o vidro, tendo uma transmissão de luz de 92% comparativamente com o PC, cujo valor ronda os 88%. Apesar de ambos poderem ser utilizados no envidraçamento, o acrílico pode ser polido para restaurar a sua claridade enquanto que o policarbonato não. Quanto à durabilidade, o acrílico consegue suportar temperaturas inferiores ao policarbonato, mas pode expandir e contrair com variações de temperatura, já o policarbonato consegue resistir a temperaturas superiores, uma vez que também exige temperaturas de processamento superiores, tendo uma baixa inflamabilidade [60]. O PMMA reage com químicos, enquanto o policarbonato tem uma maior resistência no sentido em que apenas é atacado por ácidos, bases, solventes orgânicos fortes e alguns combustíveis [61]. Na moldação, no caso do acrílico é necessária uma atenção especial devido aos riscos de contaminação da matéria (desde as operações de transporte e manuseamento ao percurso dentro da injetora). O processamento de policarbonato exige a temperatura e pressão de injeção mais elevadas, devido à sua elevada viscosidade, enquanto que o acrílico exige uma maior pressão de compactação de forma a compensar a elevada contração volumétrica inerente ao material. O tempo de pressurização do policarbonato deve ser o mais curto possível para prevenir tensões residuais internas, que pode resultar em degradação do material [14, 60, 62].

Tanto o PMMA como o policarbonato apresentam uma boa estabilidade dimensional, ainda que o primeiro seja relativamente superior [63].

Economicamente, os valores são semelhantes embora o acrílico seja normalmente mais caro que o policarbonato [58]. Em termos de acabamento superficial, o policarbonato é compatível com uma vasta gama de tintas para revestimento comparando com o acrílico, o que permite uma maior flexibilidade de produção [61].

Assim sendo, com base nos critérios mencionados acima e face aos requisitos da peça em causa, optou-se pelo policarbonato. Após consultar uma base de dados de um grande fabricante de polímeros industriais, a SABIC, foi encontrado uma vasta nomenclatura de policarbonatos para a técnica de processamento de moldação por injeção, que esteja disponível na Europa, associada à indústria de aplicações domésticas e/ou decoração e dentro dessas indústrias, compatíveis com aplicações pequenas para exterior e/ou interior. Face ao exposto, foi escolhido um policarbonato com a seguinte designação LEXAN™ RESIN 103R (cuja propriedades estão presentes no folheto informativo no **ANEXO A**), que por sua vez faz parte da biblioteca materiais poliméricos disponível no programa computacional a ser utilizado, o AMI® 2016 [64, 65]. Na **Tabela 3** são apresentados os valores típicos das principais propriedades do polímero, obtidos por estas duas fontes.

Tabela 3 - Valores típicos do PC LEXAN™ RESIN 103R [65]

Propriedades	Valores Típicos
Densidade [kg/m ³]	1.200,000
Módulo de elasticidade (nas duas direções principais) [MPa]	2280,000
Coeficiente de <i>Poisson</i> (ν_{12} e ν_{23})	0,417
Módulo de corte (G ₁₂) [MPa]	804,500
Resistência ao impacto (Charpy c/ entalhe a 23°C) [kJ/m ²]	35,000
Condutividade térmica [W/m °C]	0,200
Índice de fluidez (300°C/1,2kg) [cm ³ /10min]	6,000

4.3. Dimensões

No seguimento da seleção do material, dimensionou-se a peça mencionada anteriormente, com base nas condicionantes impostas pelo material escolhido, ou seja, na sua elaboração foram tidas em consideração regras de *design* para a moldabilidade nas espessuras utilizadas, nos ângulos e nas arestas especificamente para o material selecionado.

Na definição da espessura da peça foi tida em consideração tanto a espessura mínima, como a máxima, possíveis na moldação por injeção no geral, bem como o intervalo de espessura recomendado para o material selecionado (1,02-3,81mm). Na passagem da base para a parede lateral, teve-se a atenção de promover uma variação de espessura não muito abrupta, garantindo o valor recomendado do raio interior mínimo. O ângulo de saída da peça (2°) foi outro ponto tido em conta, uma vez que a altura da peça (125 mm) exige um cuidado acrescido no seu dimensionamento. A linha de partição não foi coincidente com o bordo superior do copo (extremo da peça) de forma a que exista um melhor controlo

dimensional, e na possibilidade de existir alguma pequena rebarba, esta seja mais facilmente eliminada sem comprometer a estética do produto. As arestas vivas possíveis na localização mencionada anteriormente foram eliminadas para evitar a concentração de tensões residuais e empenos [17, 61, 66].

As dimensões utilizadas estão expostas na secção em corte da **Figura 23**, bem como uma vista em perspectiva (ver desenho técnico no **ANEXO B**). Uma vista do detalhe dos aspetos mencionados nos dois últimos pontos estão na **Figura 24**.

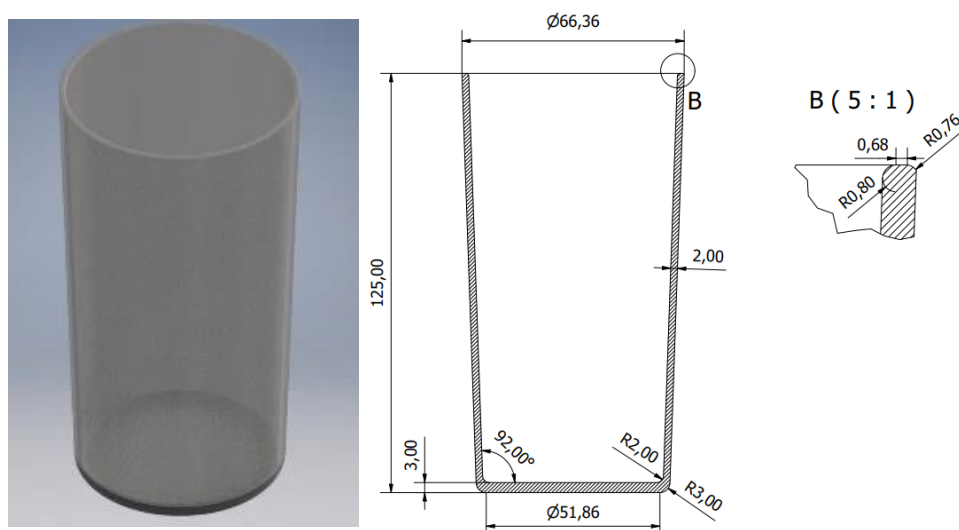


Figura 23 – Vista em perspectiva da peça e vista da secção em corte com as respectivas dimensões

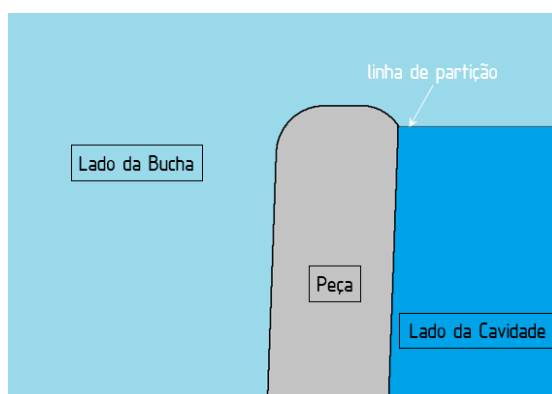


Figura 24 - Pormenor da linha de partição e dos lados da bucha e cavidade

O programa utilizado para a modelação da peça e dos respetivos desenhos foi o AIP® 2019.

Todas as características de *design* acima mencionadas têm como objetivo acautelar um escoamento uniforme do polímero fundido ao longo da peça, para além de facilitar a extração de peça do molde.

Trata-se de uma peça que não faz parte de um conjunto, ou seja, não integra uma montagem no qual é inserida (como a maioria das peças, por exemplo, da indústria automóvel). Ainda assim, foi atribuído um toleranciamento naquelas que são as cotas críticas da peça.

As tolerâncias foram obtidas pelos valores recomendados para o tipo de plástico utilizado em *SPI Plastics Engineering Handbook* [61], tendo sido selecionados os valores comuns de produção ao nível mais económico (valor comercial).

Na **Figura 25** é visível uma vista do copo e dessas cotas críticas (desenho técnico no **ANEXO C**), saliente-se que o diâmetro com a respetiva tolerância é examinado nos dois planos perpendiculares (plano ZY e plano ZX).

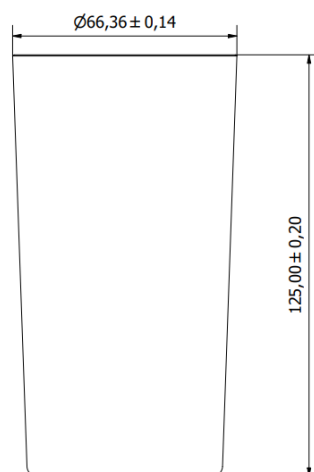


Figura 25 – Cotas críticas do copo e respetivo toleranciamento

4.4. Molde

Depois de dimensionada a peça, procedeu-se ao dimensionamento do molde de injeção para o copo. O programa AIP® 2019, já utilizado, permite criar o molde automaticamente com base no modelo de CAD (*Computer Aided Design*) da peça plástica definida para injeção.

O molde previsto será um molde de duas placas, mas apenas de uma cavidade. Esta opção foi escolhida apesar de se tratar de uma peça comum de baixo custo, o que representaria logo de antemão uma vantagem num molde multi-cavidade, no entanto, se a tecnologia estipulada para os canais conformais exige tecnologias mais dispendiosas que as convencionais, é do interesse que o molde seja mais pequeno e de baixa complexidade.

O projeto do molde inicia-se com a importação da peça em formato CAD, de seguida, é necessário ter em atenção a correta orientação da peça, ou seja, de forma a que a cavidade esteja orientada no sentido positivo do eixo 'Z'. Após ser atribuído o material específico à peça, é necessário criar uma bucha e uma cavidade, pelo que para a sua geração é requisito

prévio definir a configuração da peça de trabalho, que não é nada mais que delimitar o volume da cavidade e da bucha. Esta delimitação é obtida através da definição das diferentes cotas segundo a direção positiva e negativa dos eixos coordenados (X, Y e Z).

O valor selecionado para as cotas da peça de trabalho segundo X e Y, foi metade do valor da cota do produto respetiva e selecionaram-se valores iguais devido à geometria da peça. Assim, esta peça de trabalho tem de dimensão 132,72 x 132,72 [mm]. Quanto ao valor da cota da peça de trabalho segundo a direção Z, atribuiu-se um valor mais baixo à direção positiva relativamente à direção negativa, conferindo 25 e 35 mm respetivamente. Estes valores basearam-se em cerca de metade da dimensão da face da peça que lhe é perpendicular.

Após definir estas dimensões, é necessário definir a superfície de partição, a superfície que divide a cavidade da bucha. Para definir o contorno da superfície de partição, foi selecionada a aresta que fica definida na **Figura 24** e a superfície foi criada, seguindo-se a geração da bucha e a cavidade (**Figura 26**).

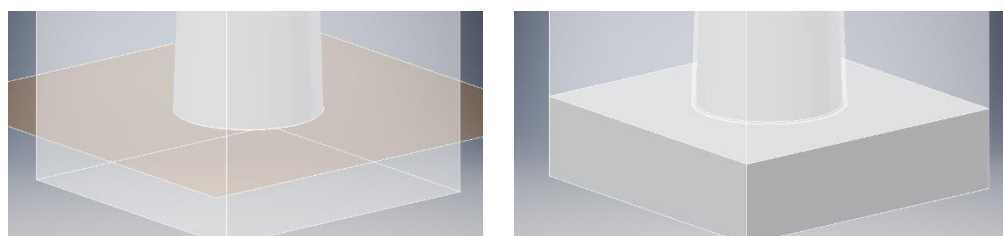


Figura 26 - Superfície de partição definida a laranja (esquerda) e macho e cavidade resultante (direita)

Para a estrutura do molde, avaliou-se a dimensão dos principais componentes do porta-molde (placa da cavidade e da bucha) de forma a garantir um dimensionamento adequado. Nas opções de bases de moldes com 2 placas, selecionou-se como fornecedor a FUTABA do tipo SA-S e tamanho 230 x 230 [mm], com base nos critérios já mencionados. Apesar de se ter optado por este tamanho, foi necessário personalizar o mesmo uma vez que a altura da placa da cavidade não era suficiente para alojar a cavidade definida anteriormente, pelo que a sua altura foi incrementada (em 75mm) bem como o comprimento das respetivas guias (em 30mm) que terão que acompanhar minimamente este incremento. A **Figura 27** ajuda a visualização do resultado final, bem como o desenho de conjunto do molde me anexo (**ANEXO D**).

Apesar do detalhe na realização deste modelo, todo o procedimento destina-se apenas a um dimensionamento o mais próximo possível de um molde real para definir um bloco de molde que será utilizado no estudo com o programa de simulação reológica, AMI® 2016.

A dimensão da placa da cavidade e da placa da bucha (**Figura 27**, respetivamente o componente de cor azul e de cor vermelha) especificada na **Tabela 4**, foi utilizada no capítulo seguinte, para o bloco do molde a ser analisado na ótica de transferência de calor pelo já referido programa. Por este motivo, apesar de se estar perante uma estrutura constituída pelos componentes já mencionados, apenas foram tidas em consideração a placa da

cavidade e a placa da bucha, pois, considerou-se serem estes os que têm uma maior importância na perspectiva térmica, tratando-se do maior volume e do maior contacto com a peça.

Entretanto, o sistema de extração e os componentes responsáveis pelo guiamento do molde influenciam significativamente o tipo de sistema de arrefecimento utilizado. Se para os componentes de guiamento, a sua localização não pode ser muito contornada, no caso do sistema de extração e de arrefecimento, estes condicionam-se influenciando reciprocamente as suas arquiteturas. Todavia, e de forma a facilitar a análise reológica, o modelo foi simplificado, ou seja, não foi modelado qualquer sistema de extração ou de guiamento, tendo consciência da aproximação realizada assim como as suas consequências face a um caso real.

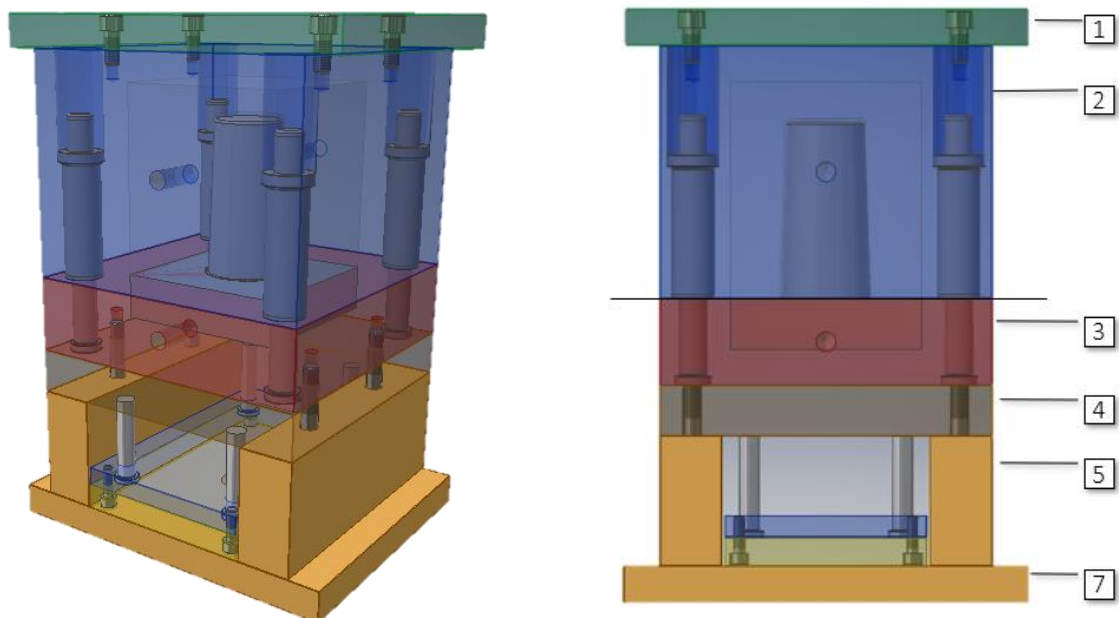


Figura 27 - Vista em perspectiva (esquerda) e vista ortogonal (direita) do modelo tridimensional obtido (molde e porta-molde)

Tabela 4 – Componentes principais do molde e dimensões da placa da cavidade e da bucha

	Componente	Dimensões [mm]
1	Placa de aperto da injeção	-
2	Placa da cavidade	230 x 230 x 175
3	Placa da bucha	230 x 230 x 60
4	Placa de reforço da bucha	-
5	Calços	-
6	Placa de aperto da extração	-

4.5. Máquina de Injeção

A máquina de injeção selecionada para a peça em estudo terá que garantir que todas as exigências relativas ao processo correspondente sejam cumpridas. Então, utilizou-se a máquina de moldação por injeção predefinida pelo AMI[®], uma vez que as suas características, listadas em baixo, permitem garantir os requisitos impostos pela peça com uma margem considerável.

- **Força de fecho máxima:** 7000 ton
- **Taxa de injeção máxima:** 5000 cm³/s
- **Pressão de injeção máxima:** 180 MPa

Estes dados são obtidos a partir da interface gráfica do AMI[®] referente à máquina de injeção, que, à partida, terão de garantir uma grande margem de segurança, em relação aos valores necessário para assegurar uma bem-sucedida moldação da peça.

4.6. Condições de processamento

As condições de processamento são um ponto essencial naquilo que é a moldação por injeção. Estes estão apresentados de seguida na **Tabela 5**.

Ainda que tenha sido selecionado um perfil de controlo de compactação/manutenção, no qual é aplicada uma pressão equivalente a 80% da pressão de enchimento durante 10s (perfil por defeito), este perfil será revisto posteriormente.

O parâmetro de ‘Tempo de Injeção + compactação + arrefecimento’, ou seja, é o tempo total destas três etapas foi alterado para automático de forma ao programa calcular

o tempo necessário para a peça arrefecer (uma vez que o tempo de injeção e compactação já se encontram definidos) até atingir os critérios de extração. Esses critérios são:

- o molde atingir a temperatura desejada da superfície do molde;
- a peça atingir a temperatura definida para a extração (125°C);
- uma percentagem mínima da peça solidificada a esta mesma temperatura (definida no seu valor máximo, em 100%);

Tabela 5 - Condições de processamento utilizadas

Parâmetro		Valor
Temperatura [°C]	Temperatura do fundido	300
	Superfície do molde	100
	Extração	125
	Ambiente	25
Controlo do Enchimento		Automático
Comutação velocidade/pressão		Por % de volume (Em 99%)
Controlo de compactação/manutenção		% de pressão de enchimento vs. Tempo (Perfil de controlo de compactação/manutenção)

4.7. Estudo de independência da malha

Em consequência do estudo se estabelecer com base em simulações, é necessário aplicar uma malha à peça em análise para que se possa proceder à mesma, discretizando o domínio de cálculo em elementos finitos. Neste sentido foi feito um estudo de independência da malha no AMI[®] através da simulação de um enchimento e de um arrefecimento possível do objeto de estudo. Antes de o copo ser importado para o programa é necessário selecionar o tipo de malha com o qual se pretende trabalhar, sendo a malha selecionada para a peça 'sólido 3D' uma vez que apesar da simplicidade da peça, existem regiões cuja espessura é considerável e há interesse em analisar essas mesmas zonas com algum detalhe. A importação foi concluída através do AMDL[®] (*Autodesk Moldflow Design Link[®]*), tendo sido selecionadas várias dimensões para a malha (com base nas dimensões da peça, nível de detalhe) e nas mesmas condições realizaram-se vários estudos para aferir a relação entre a discretização da malha e os resultados/parâmetros mais relevantes. Relativamente ao número mínimo de elementos tetraédricos ao longo da espessura, foi

mantido em 6, uma vez que cumpre os valores recomendados para as dimensões avaliadas [67].

A análise efetuada consiste na simulação das fases de Arrefecimento + Enchimento. No arrefecimento recorreu-se a um sistema de 8 canais convencionais com 8mm de diâmetro e 136,36mm de comprimento, uma distância entre canais e à peça de 20mm e 25mm, respetivamente e com um número de *Reynolds* de 10000 como (estes valores foram obtidos no dimensionamento do sistema de arrefecimento, em 0). Importa ainda referir que estes valores foram utilizados, mas poderiam ter sido outros desde que minimamente adequados para este caso em específico.

Quanto ao enchimento, selecionou-se o ponto de injeção (ataque) na base do lado exterior do copo pois é a localização mais adequada para o tipo de peça (tópico abordado e comprovado de seguida, em 4.9), e relativamente às definições de processamento mais relevantes neste tópico (tendo estas já sido abordadas em 4.6), o fundido encontra-se à temperatura de 300°C, o controlo do enchimento é automático e a comutação Velocidade/Pressão é feita aquando da percentagem de volume cheio atinge os 99%. A **Figura 28** permite uma melhor visualização do descrito anteriormente.

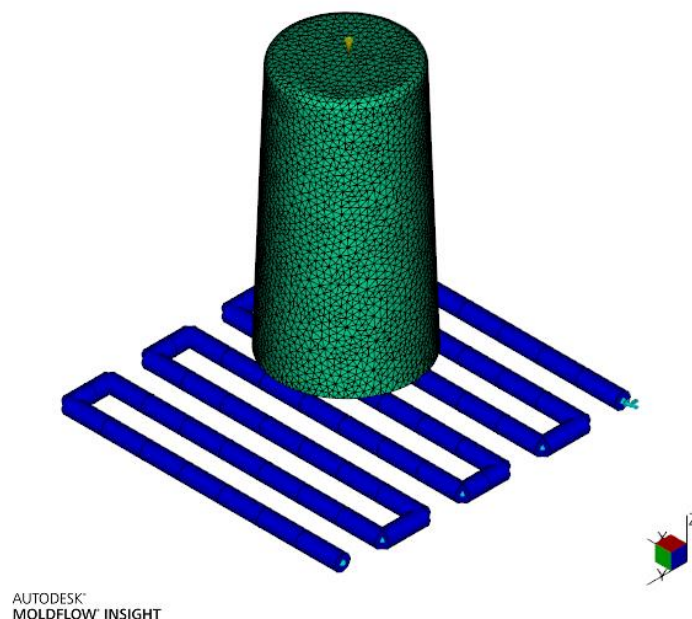


Figura 28 – Modelo utilizado na simulação de Arrefecimento + Enchimento (malha de 3mm)

No sentido de averiguar a independência dos resultados de simulações do tamanho da malha, o tamanho do lado do elemento tetraédrico da foi variado a 3, 2 e 1 milímetros e estabelecido automaticamente pelo AMDL®. Os parâmetros indicadores escolhidos para avaliar a qualidade da malha foram: o tempo de enchimento, a temperatura da superfície da peça e a temperatura média do exterior do molde. Este último indicador, para uma análise de Arrefecimento (BEM, *Boundary Element Method*) permite obter uma temperatura do molde modelando uma superfície externa do molde em torno do modelo com o objetivo

de melhorar a precisão de uma análise arrefecimento. Importa ainda referir que esta análise é mais rápida, mas menos precisa e rigorosa que Arrefecimento FEM (*Finite Element Method*).

Na **Tabela 6** podem ver-se os resultados obtidos. Como seria de esperar, à medida que o comprimento do lado do elemento da malha tridimensional diminui, o número de elementos da malha aumenta, tendo as razões de aspeto (relação entre o comprimento dos lados do elemento tetraédrico) valores muito variados, no entanto de um modo geral, devido à simplicidade da peça, os valores são muito semelhantes pelo que não se justifica uma maior discretização do domínio de cálculo. A malha foi avaliada do ponto de vista quantitativo, ou seja, foi analisada a duração do tempo de enchimento com base no refinamento da malha e analisou-se a variação da capacidade de arrefecimento (pela temperatura da superfície da peça e temperatura média exterior do molde). Todos os valores resultantes de cada estudo foram também analisados da perspetiva de esforço computacional, neste caso o tempo de CPU (*Central Process Unit*). Com base no apresentado, a malha selecionada foi a de comprimento do lado 2mm, uma malha que apresenta uma razão de aspeto satisfatória, e quantitativamente os valores são muito semelhantes, diferindo no caso do tempo de enchimento as milésimas de segundo [68, 69]. A esta proximidade entre valores, está aliado um tempo de CPU relativamente baixo, sendo este um aspeto decisivo, pois, trata-se de uma análise simples que não tem em conta o tempo necessário para o cálculo associado às fases de Compactação e de Empeno que estarão presentes nas simulações subsequentes.

Tabela 6 – Resultados do estudo de independência de malha

Estudo		1	2	3	4
Comprimento lado [mm]		3mm	2mm	Automático	1mm
Número de Elementos		165221	360547	557763	1397094
Razão de Aspeto	Máxima	25,93	27,39	17,5	21,65
	Média	7,48	5,10	4,14	2,84
	Mínima	1,13	1,14	1,06	1,08
Tempo de Enchimento [s]		1,4759	1,4825	1,4816	1,4823
Temperatura da superfície da peça [°C]	Máxima	186	183	185	185
	Média	138	136	137	138
	Mínima	108	105	106	107
Temperatura média exterior do molde [°C]		91,1	89,9	89,8	91,3
Tempo de CPU [min] (arrefecimento+enchimento)		1+11	8+22	20+39	98+86

4.8. Sistema de Arrefecimento

O sistema de arrefecimento conforme já foi mencionado, é definido consoante várias geometrias, pelo que variará numa série de características particulares de cada uma. Mesmo assim, o seu dimensionamento do ponto de vista dos canais e das características do fluído operante foi calculado com base no método analítico presente no manual do projetista [14]. Independentemente de ser um método empírico, sem grande especificidade que assume um conjunto de simplificações, esta metodologia permite obter alguma perceção sobre os valores resultantes em causa.

O balanço térmico do molde (representado esquematicamente na **Figura 4**) é dado pela seguinte expressão:

$$\sum_i \dot{Q}_i = \dot{Q}_{TM} + \dot{Q}_{PI} + \dot{Q}_{Amb} = 0 \quad (1)$$

Onde,

- \dot{Q}_{TM} – Calor transferido pelo meio arrefecedor
- \dot{Q}_{PI} – Calor trazido pelo fundido
- \dot{Q}_{Amb} – Calor transferido para o ambiente

E conforme já foi referido em 2.3,

$$\dot{Q}_{Amb} = \dot{Q}_{cond} + \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{rad} \quad (2)$$

Onde,

- \dot{Q}_{cond} – Calor por condução
- \dot{Q}_{conv} – Calor por convecção
- \dot{Q}_{rad} – Calor por radiação

O fluxo de calor cedido pelo fundido, é dado pela seguinte expressão:

$$\dot{Q}_{PI} = \frac{m \times (h_{inj} - h_{ext})}{t_c} \quad (3)$$

Onde,

- m – massa de fundido injetada [kg]
- h_{inj} – entalpia específica do PC à temperatura de injeção [J/kg]
- h_{ext} – entalpia específica do PC à temperatura de extração [J/kg]
- t_c – tempo de residência do PC no molde [s]

A massa de fundido considerou-se a obtida a seguir em 4.9.1 (análise AMI®). Por outro lado, as entalpias específicas do PC à temperatura de injeção e de extração são, respetivamente, 600 kJ/kg e 150 kJ/kg [70].

Quanto ao tempo de residência, este é dado pela expressão:

$$t_c = \frac{S^2 \ln(k \cdot Y)}{\pi^2 \alpha_{ef}} \quad (4)$$

Na qual,

- S – espessura da parede [m]
- α_{ef} – difusividade térmica efetiva média [$\mu\text{m}^2/\text{s}$]
- K – coeficiente dependente da espessura da peça - $4/\pi$
- Y – temperatura adimensional, resultando da expressão,

$$Y = \frac{T_{inj} - T_{molde}}{T_{ext} - T_{molde}} \quad (5)$$

- T_{inj} – Temperatura de injeção - 300°C
- T_{ext} – Temperatura de extração - 125°C
- T_{molde} – Temperatura do molde - 100°C

A espessura considerada foi a máxima da peça (3mm), à qual corresponde um coeficiente k para peças finas. Quanto á difusividade térmica para o PC foi de 0,000105 $\mu\text{m}^2/\text{s}$.

Assim, vem:

$$Y = 8$$

E por sua vez:

$$t_c = 20,1 \text{ s}$$

O que resulta num fluxo de calor transferido do polímero para o molde:

$$\dot{Q}_{PI} = 1393,1 \text{ J/s}$$

Relativamente ao calor transferido para o ambiente:

Calor transferido por condução

O fluxo de calor transferido por condução para as placas de fixação do molde e é proporcional à diferença de temperatura entre este último e o ambiente, sendo calculado pela seguinte equação:

$$\dot{Q}_{cond} = A_{fix} \times \beta \times (T_{amb} - T_{molde}) \quad (6)$$

Onde,

- A_{fix} – área de fixação do molde [m²]
- β – fator de proporcionalidade [W/m² °C]
- T_{amb} – temperatura do ambiente - 25°C

A área de fixação do molde corresponde à área das placas de aperto, cujas dimensões são 280x230 e 230x230 [mm], respetivamente a da injeção e a da extração, que correspondem a uma área de 0,17 m². Já o fator β corresponde a um aço de baixa liga pelo que o seu valor é 100 W/m² °C.

Calor transferido por convecção

O fluxo de calor transferido por convecção para o ambiente envolvente pela área lateral do molde e também é proporcional à diferença de temperatura entre este último e o ambiente, sendo calculado pela seguinte equação:

$$\dot{Q}_{conv} = A_{lat} \times \alpha \times (T_{amb} - T_{molde}) \quad (7)$$

Onde,

- A_{lat} – área exposta do molde [m²]
- α – coeficiente de transferência de calor por convecção livre do ar [W/m² °C]

A área exposta do molde corresponde neste caso à área lateral do volume de controlo, ou seja, a 0,216 m². Quanto ao coeficiente é aproximadamente 15 W/m² °C.

Calor transferido por radiação

O fluxo de calor transferido sob a forma radiação é calculado pela seguinte equação:

$$\dot{Q}_{rad} = A_{lat} \times \varepsilon \times C_{rad} \times \left(\left(\frac{\theta_{amb}}{100} \right)^4 - \left(\frac{\theta_{molde}}{100} \right)^4 \right) \quad (8)$$

Onde,

- ε – fator de emissão

- C_{rad} – coeficiente de radiação do corpo negro [$W/m^2 \text{ } ^\circ C$]
- Θ – temperatura absoluta (obtida pela expressão $K = ^\circ C + 273,18$)

O fator de emissão é 0,25 por se tratar de aço, quanto ao coeficiente de radiação é $5,77 W/m^2 \text{ } ^\circ C$.

Através do respetivo cálculo, obtiveram-se os valores:

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{cond} &= - 879,8 \text{ J/s} \\ \dot{Q}_{conv} &= - 243,2 \text{ J/s} \\ \dot{Q}_{rad} &= - 165,7 \text{ J/s}\end{aligned}$$

Que permite quantificar o fluxo de calor transferido para o ambiente,

$$\dot{Q}_{amb} = - 1288,7 \text{ J/s}$$

O que resulta,

$$\dot{Q}_{TM} = - 104,3 \text{ J/s}$$

É facilmente perceptível que o fluxo de calor libertado para o meio ambiente é elevado, relativamente ao calor transferido ao molde pelo polímero fundido, resultando assim um valor baixo para ser extraído pelo meio refrigerante. O caudal desse meio é obtido pela seguinte expressão:

$$\dot{m} = \frac{|\dot{Q}_{TM}|}{C \times \Delta T} \quad (9)$$

Onde,

- C – calor específico do fluído [$kJ/kg \text{ } ^\circ C$]
- ΔT – variação de temperatura do fluído [$^\circ C$]

A variação de temperatura no geral é em geral de $2^\circ C$ a $5^\circ C$, pelo que se atribui um valor intermédio de $3^\circ C$. O fluído em causa foi água a $90^\circ C$, pois é uma prática recorrente utilizar um fluído com uma temperatura sensivelmente $10^\circ C$ inferior à do molde. Assim, o calor específico é de $4,205 kJ/kg \text{ } ^\circ C$ para a temperatura em questão.

O caudal pela expressão:

$$\dot{m} \approx 0,5 \text{ l/min}$$

Para este caudal, é recomendado, pela mesma fonte, um canal de diâmetro ligeiramente superior a 6 mm. Pode ser adotado este valor ou incrementar para o valor tipicamente utilizado seguinte, 8 mm. No entanto, e fazendo uma análise crítica sobre o valor inferior, as simplificações deste método do ponto de vista térmico, como as flutuações de temperatura e os fluxos térmicos serem desprezáveis tornam este valor muito reduzido, ainda que a peça seja de pequena dimensão.

O número de *Reynolds* foi calculado de forma a avaliar o escoamento do fluído com estes parâmetros. Este parâmetro adimensional que analisa o comportamento dos fluídos newtonianos é dado pela seguinte expressão:

$$Re = \frac{\rho \times d \times v}{\mu} \quad (10)$$

Onde,

- ρ – densidade do fluído [kg/m³]
- d – diâmetro do canal [m]
- v – velocidade do fluído [m/s]
- μ – viscosidade dinâmica [kg/m. s]

Utilizando os valores respetivos à água na temperatura a que circula (90°C), resultou um número de *Reynolds* igual a 337.

O regime turbulento do fluxo que percorre o interior dos canais de arrefecimento é atingido com um número de *Reynolds* na gama dos 2200-4000. Logo este valor é demasiado baixo para poder garantir um escoamento turbulento mesmo para um canal de dimensão reduzida, o que não proporciona uma eficiente extração de calor. Assim sendo, optou-se por aumentar o diâmetro dos canais de arrefecimento para 8mm de forma a melhorar a transferência de calor, tendo alguma sensatez neste aumento com base na dimensão da peça [14]. Por outro lado, o caudal foi incrementado para garantir o regime já mencionado [18].

Isto do ponto de vista teórico, porque na perspetiva de simulação no AMI®, apesar do escoamento turbulento ser atingido numa gama muito semelhante (2300-4000) e um número de *Reynolds* de 4000 num fluxo ser considerado completamente turbulento, uma boa prática é utilizar um número de *Reynolds* de 10000 para representar um escoamento turbulento aquando da execução de uma análise [71].

Após este dimensionamento, foi analisada a disposição das águas no molde em termos do passo entre canais e na sua profundidade. O passo entre canais está dependente do diâmetro, enquanto que a profundidade está dependente do passo, conforme a **Figura 29**. Com base no exposto, as dimensões são apresentadas na **Tabela 7**, bem como as relações selecionadas.

O dimensionamento do sistema de arrefecimento foi feito para uma configuração convencional em 'Z' (zig-zag) através do Assistente do AMI® que através da dimensão da peça e dos parâmetros já calculados, criou o sistema apresentado na **Figura 30**.

Este foi o ponto de partida, para as configurações restantes (apresentadas no próximo capítulo) houve uma adaptação distinta a cada caso, no entanto, num aspeto, todas foram

semelhantes, apenas a bucha teve este sistema de arrefecimento. Esta opção deveu-se à bucha ter um volume muito menor para dissipar o calor, comparativamente à cavidade, o que resulta numa maior concentração desse mesmo calor.

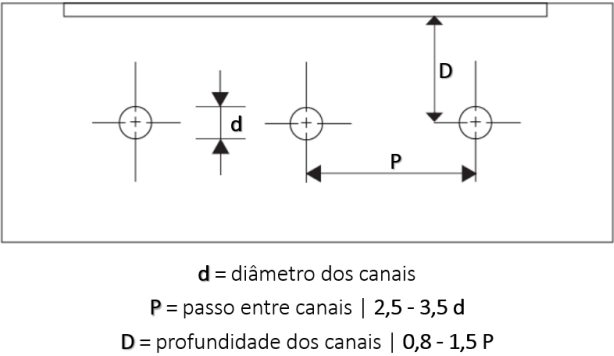


Figura 29 - Distâncias relativas aos canais de arrefecimento em elementos moldantes – adaptada de [14]

Tabela 7 - Posicionamento dos canais de arrefecimento

	Relação	Dimensão [mm]
diâmetro dos canais d	-	8
Passo entre canais P	2,5 d	20
Profundidade dos canais D	1,25 P	25

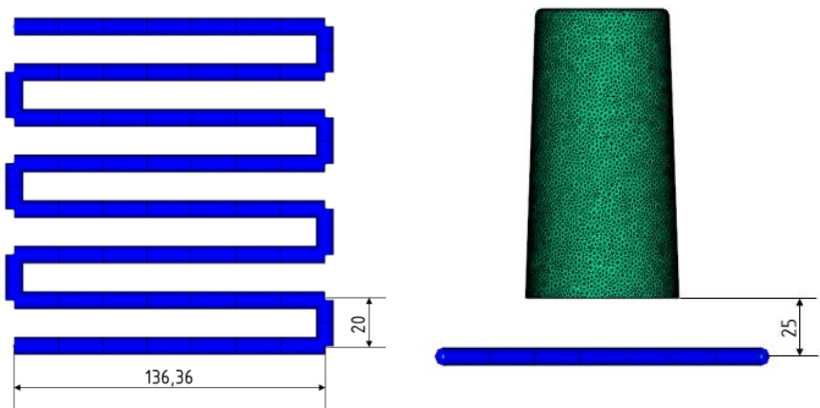


Figura 30 – Sistema de Arrefecimento obtido com recurso do AMI® e dimensões correspondentes na vista de cima (esquerda) e na vista de lado (direita)

4.9. Sistema de Alimentação

Seguidamente à seleção da malha de elementos finitos, fez-se um estudo ao sistema de alimentação a ser aplicado na peça. Iniciou-se este estudo pela localização do ataque, que para peças deste tipo, é geralmente localizado na base do lado exterior [17]. De qualquer modo, utilizou-se o *software* AMI® para sustentar e validar esta questão. A **Figura 31** permite comprovar que efetivamente se trata de uma boa localização para o ataque. Ainda assim, com base na mesma figura é possível verificar que existem outras localizações adequadas para o ataque, como é o caso na parede lateral exterior. Porém esta localização foi excluída uma vez que deixaria uma marca notória na parede do copo o que comprometeria o aspeto visual, para além de que as linhas de fluxo não seriam radiais pelo ataque não se encontrar centrado com a peça.

Relativamente ao sistema de alimentação propriamente dito, optou-se por uma configuração constituída por canais quentes (ataque direto através de bico quente mais especificamente), devido às vantagens que advêm da sua utilização. Vantagens como a eficiência no uso de material e a inexistência de operações ulteriores ao processo, ou seja, não há desperdício de material com um sistema de alimentação frio e não é necessário removê-lo após a extração.

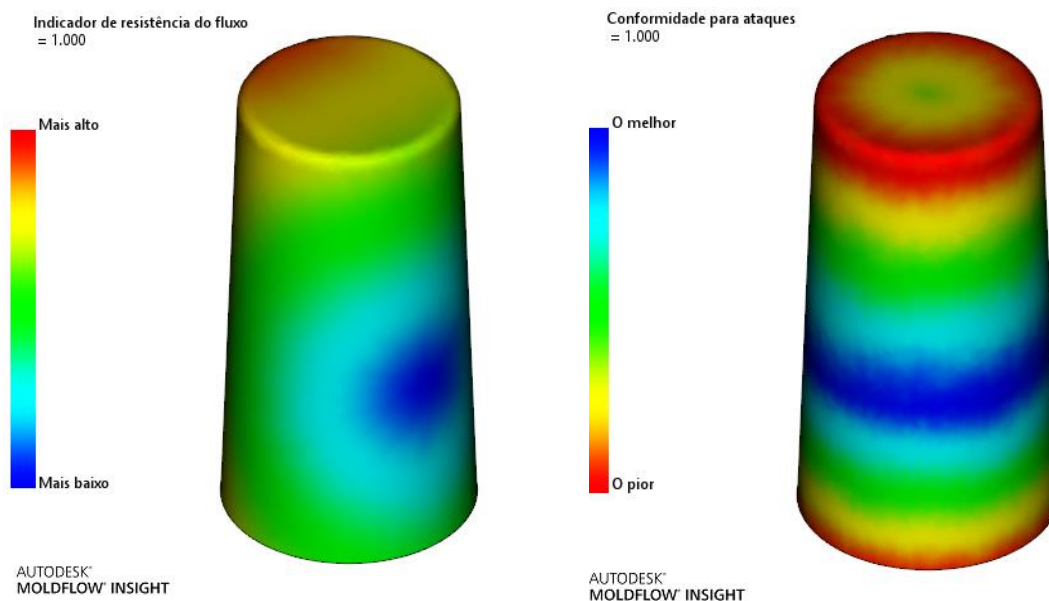


Figura 31 - Indicador de resistência ao fluxo (esquerda) e conformidade para ataques (direita)

4.9.1. Modelação do sistema de alimentação

Para o dimensionamento do sistema de alimentação, recorreu-se ao catálogo de canais quentes da HASCO®, selecionando-se um *Techni shot Mono*, tratando-se de um mono bico para artigos de paredes finas ou curtos períodos cíclicos [72]. Dentro desta gama, foram escolhidos os bicos quentes com base nos critérios indicados pelo fabricante. Os critérios foram o peso da peça, a temperatura do bico e o material a ser injetado e serão especificados e descritos em seguida.

O peso da peça foi calculado de duas formas, analiticamente e através do AMI®.

Na primeira, pelo rearranjo da expressão da densidade do material (ρ) em função do quociente da massa da peça (m) pelo seu volume (v) e com base na peça ter uma densidade de 1,2 g/cm³ e um volume de 53,7 cm³, resulta uma massa de 64g.

Com recurso a uma simulação por AMI® (com compactação), resultou um peso de 62,4g. Este último valor ainda que muito próximo do anterior, deve-se à aproximação no cálculo analítico, à densidade não ser constante em todo o volume da peça (como considerado no analítico) mas principalmente devido à contração volumétrica da peça no molde. A peça ao contrair, não ocupa todo o volume da cavidade moldante e por consequência, tem um menor peso. No entanto permite ter uma noção do valor em causa.

O PC não reforçado utilizado possui um intervalo de temperatura recomendado de 280 a 320°C pelo que o bico terá que suportar essa gama de temperaturas.

Através da combinação destes três parâmetros, resultou a referência H334051 (cuja ficha técnica se encontra no **ANEXO E**), após análise das dimensões para o molde em estudo foi escolhido um bico quente de referência H334051/50x100 [73] com as dimensões utilizadas para a modelação do sistema de alimentação (**Figura 33**), cujas dimensões se encontram na **Figura 32**.

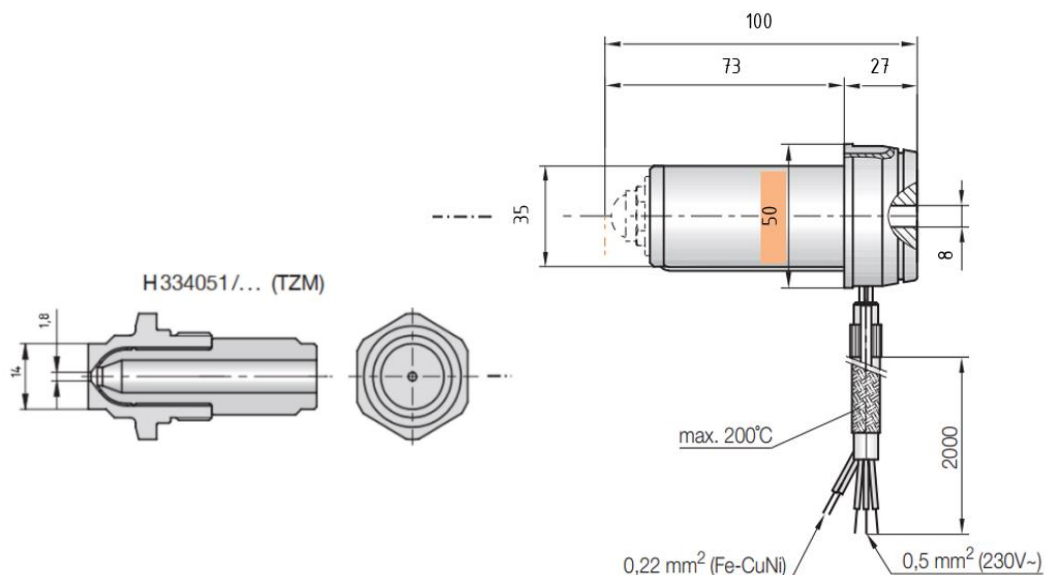


Figura 32 - Bico Quente Techni Shot H334051/50x100 e respetivas dimensões – adaptada de [73]

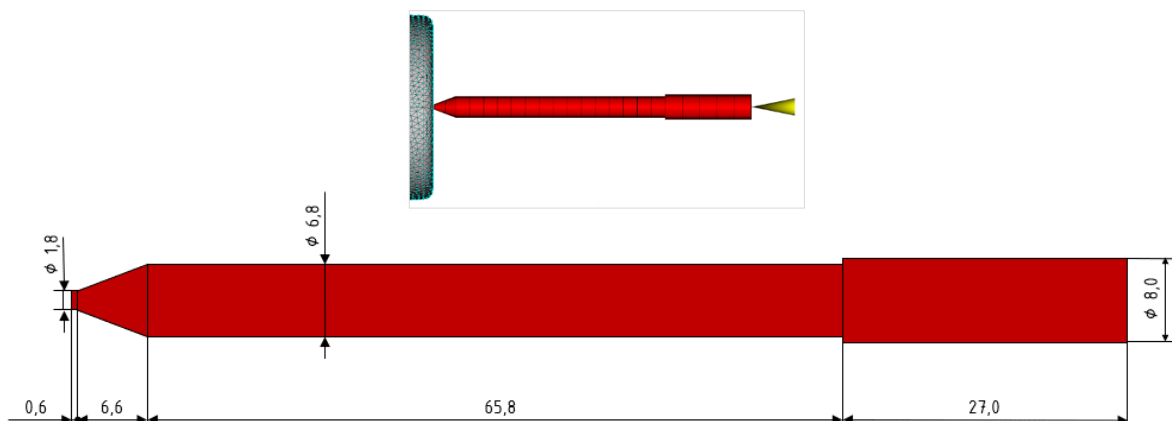


Figura 33 - Sistema de Alimentação (em cima) e respectivas dimensões (em baixo)

Conforme a imagem, é possível reconhecer o número de elementos de barra aos quais foram atribuídas a propriedade de ataque quente (um elemento de 0,6mm de comprimento) e de canal de alimentação quente (22 elementos no restante do canal quente). Este dimensionamento deve-se a uma divisão aproximada do sistema de alimentação em elementos de comprimento igual, com exceção do ataque que como é óbvio tem uma dimensão inferior.

O bico quente na sua totalidade tem um comprimento de 100 mm, no entanto e dado que apenas foi tido em conta a placa da cavidade e da bucha, o comprimento do canal quente foi reduzido para que este não ultrapasse a espessura da placa da cavidade. Evidentemente que com esta alteração, o ponto de injeção é movido para este limite.

4.10. Malha do Molde

Após estar definidos os principais parâmetros como a peça, o sistema de alimentação, o sistema de arrefecimento (que variará como mencionado anteriormente), é necessário definir a malha que irá ser aplicada ao volume de controlo que conterá todos estes elementos, ou seja, a malha do molde. Existem duas formas para o fazer:

- Importar o molde em formato CAD e atribuir-lhe uma malha;
- Criar um volume do corpo do molde e atribuir primeiro uma malha à superfície deste volume e uma tridimensional ao seu interior;

Como é evidente, a segunda hipótese foi a seleccionada devido à sua facilidade ao permitir, com as mesmas condições, uma multiplicidade de estudos sem ser necessário modelar diferentes moldes para cada caso. Para além disso, Parmar et al [74] estudaram comparativamente as duas possibilidades, e concluíram que na peça em estudo, a distribuição de temperatura da peça e do molde e na deflexão (entre outros) a diferença é muito baixa e negligenciável.

Deste modo, após os elementos funcionais estarem definidos e corretamente localizados no espaço, é preciso criar a superfície do molde, ao qual lhe é atribuída uma malha e posteriormente, criada outra tridimensional tetraédrica no seu interior.

Como exemplo demonstrativo do processo mencionado anteriormente, foi utilizada a geometria de canais convencionais (em “Z” - “Zig-Zag”) com 8 canais e com os parâmetros já definidos. Após a sua disposição, é criada a superfície do molde e a malha respectiva (**Figura 34**), sendo possível verificar na **Figura 35** como a malha da superfície, que é definida na superfície externa e na interna, envolve os diversos elementos.

Relativamente às principais dimensões da malha da superfície deste exemplo que será mais tarde aplicada a todos os casos de estudo, estão de acordo com os valores recomendados [75].

- Comprimento do lado da superfície externa do molde: 5,0 mm
- Comprimento do lado da superfície interna do molde: 1,5 mm
- Número especificado de nós nas circunferências dos cilindros: 20

Os restantes valores foram deixados por defeito, uma vez que os mesmos se encontravam apropriados para o problema no seu conjunto.

Após esta malha estar criada, é necessário analisá-la de forma a verificar se existe algum tipo de erro ou problema, como:

- **Lados livres e lados *manifold*** – lados que não estão conectados a outra superfície e lados que têm mais de dois elementos a si ligados, respetivamente;
- **Elementos não orientados corretamente**
- **Interseções** – interseções entre elementos e elementos completamente sobrepostos;

Todos estes devem ser nulos para permitirem o processamento dos dados. Após esta validação ser feita, é possível criar a malha tridimensional que tem a seguinte dimensão principal, ou seja, comprimento do lado global na superfície de 2,0 mm.

Novamente, os restantes valores foram deixados por defeito, encontrando-se apropriados para o problema no seu conjunto.

Na **Figura 36** é possível visualizar a malha tridimensional, sendo mais refinada nas regiões em que estão presentes os elementos que intervêm no processo.

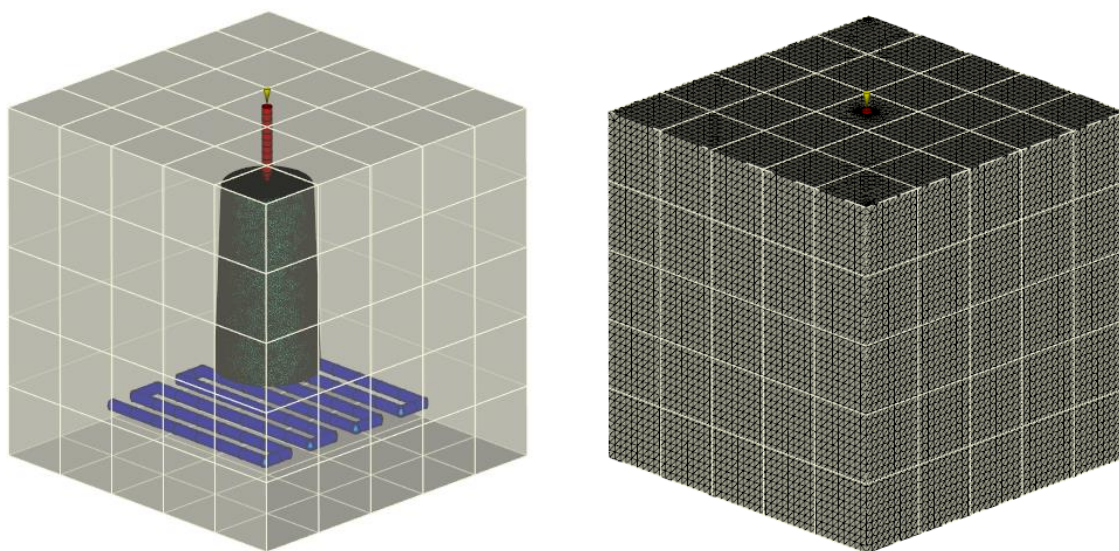


Figura 34 – Superfície do molde (esquerda) e superfície do molde com malha aplicada (direita)

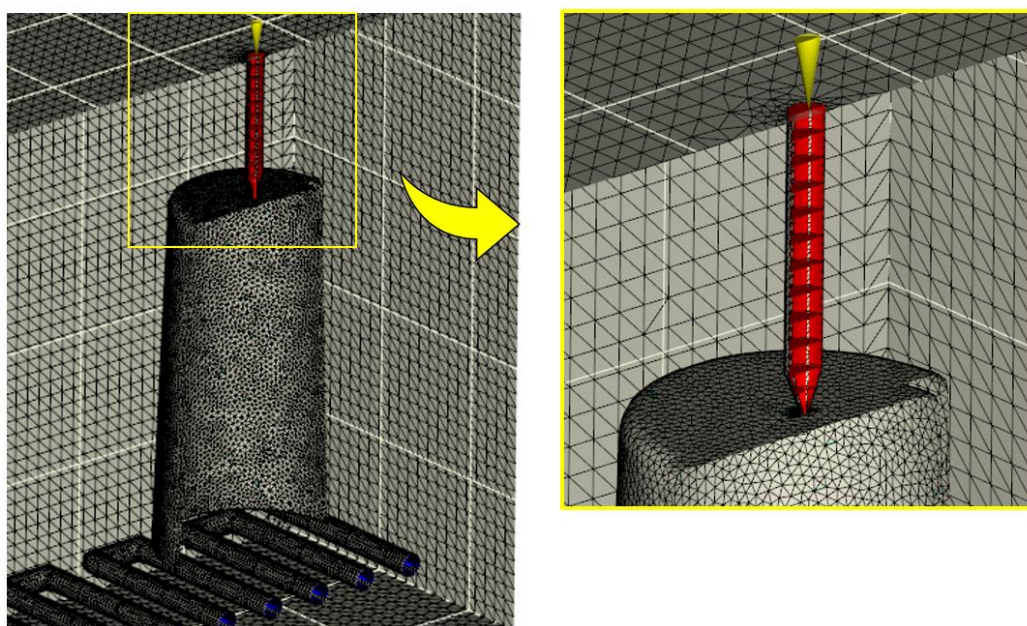


Figura 35 - Malha de superfície exterior e interior, com detalhe da malha de superfície interior no sistema de alimentação e na peça

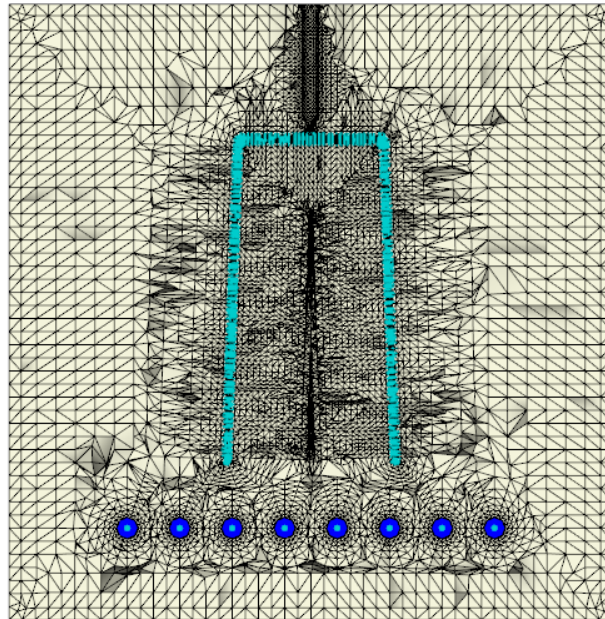


Figura 36 - Malha 3D do molde definida com recurso aos seus pontos (vista em corte pelo plano ZY)

Com este procedimento, é criada a malha tridimensional que permite definir o molde como o volume metálico que engloba a peça e os vários componentes para as simulações. Para o material que o constitui, foi definido o Aço da categoria P20, com as características apresentadas na **Tabela 8**.

Tabela 8 - Valores utilizados para o aço do molde [76]

Propriedades	Valores Típicos
Densidade [kg/m ³]	7.800,000
Módulo de elasticidade [MPa]	205.000,000
Coefficiente de <i>Poisson</i>	0,290
Limite de elasticidade [MPa]	900,000
Resistência à tração [MPa]	1070,000
Calor específico [J/kg °C]	460,000
Condutividade térmica [W/m °C]	29,000
Coefficiente de expansão térmica [1/°C]	$1,200 \times 10^{-5}$

Desta forma é possível obter resultados o mais próximos possíveis do real, com as vantagens que provêm de ser um ambiente de simulação.

4.11. Inserto

O material do molde está definido, no entanto, foi projetado um inserto para a possibilidade de estudar a influência de materiais com diferentes condutividades térmicas no processo. O inserto, em desenho na **Figura 37**, baseia-se nas dimensões da bucha, mas sem a dimensão total da sua placa respectiva.

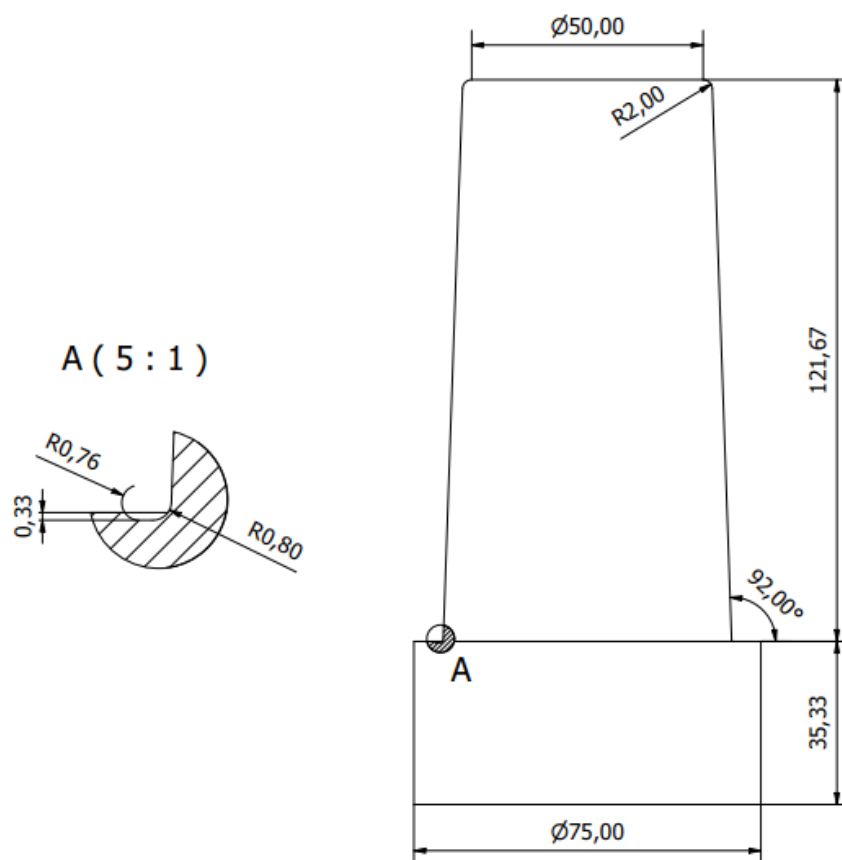


Figura 37 – Vista frontal do inserto com respectivas cotagens e detalhe do entalhe

5. Análise numérica das várias configurações de arrefecimento

O capítulo que se segue apresenta todos os casos de estudo realizados no AMI®, mostrando com base nas condições gerais apresentadas anteriormente, as modificações e adaptações realizadas a cada um em particular.

Para o estudo das diferentes configurações do sistema de arrefecimento foram selecionados seis casos de estudo. Desses seis, dois têm por base um mesmo inserto (de alta condutividade térmica) mas com características bem distintas, como de seguida é apresentado.

- Sistema de canais convencionais com estrutura em 'Z' (Zig-Zag)
- Sistema de canais com lâminas separadoras
- Sistema de canais com o núcleo de refrigeração/sistemas borbulhantes
- Inserto (postigo) com alta condutividade térmica (AMPCO 940®)
 - Inserto com linha de água a percorrer o seu interior
 - Sistema de canais convencionais com inserto.
- Sistema de canais conformais

De seguida na **Figura 38** é apresentado o procedimento geral (em ambiente AMI®) que irá ser a base de cada um dos casos anteriores, com os devidos ajustes a cada caso de estudo em particular.

O ponto 8 é destacado pela simulação a realizar ser uma análise de *Cool/ FEM 3D+Enchimento+Compactação+Empeno*. Esta análise de Arrefecimento não é nada mais que uma ferramenta disponível para moldes com uma malha tridimensional e um sistema de refrigeração previamente definido de forma a analisar a distribuição de temperatura no mesmo com precisão. Esta por sua vez permite 3 tipos diferentes de análise, Média do Ciclo, Transiente no Ciclo e Transiente desde o arranque.

Média do ciclo – Análise semelhante à de arrefecimento padrão feita pelo AMI®, utilizando o método dos elementos de fronteira (BEM) em vez do método dos elementos finitos (FEM) e indica a temperatura média em cada região do molde durante o ciclo produtivo.

Transiente no ciclo – Análise que simula a natureza cíclica do molde durante um ciclo de moldação, possibilitando observar as variações e diferenças de temperatura durante o

mesmo. Este método fornece um historial de temperaturas (com base nas iterações realizadas).

Transiente desde o arranque – Constitui uma repetição da análise anterior (transiente no ciclo) durante vários ciclos de moldação, de forma a determinar o número de ciclos produtivos para atingir uma temperatura estável.

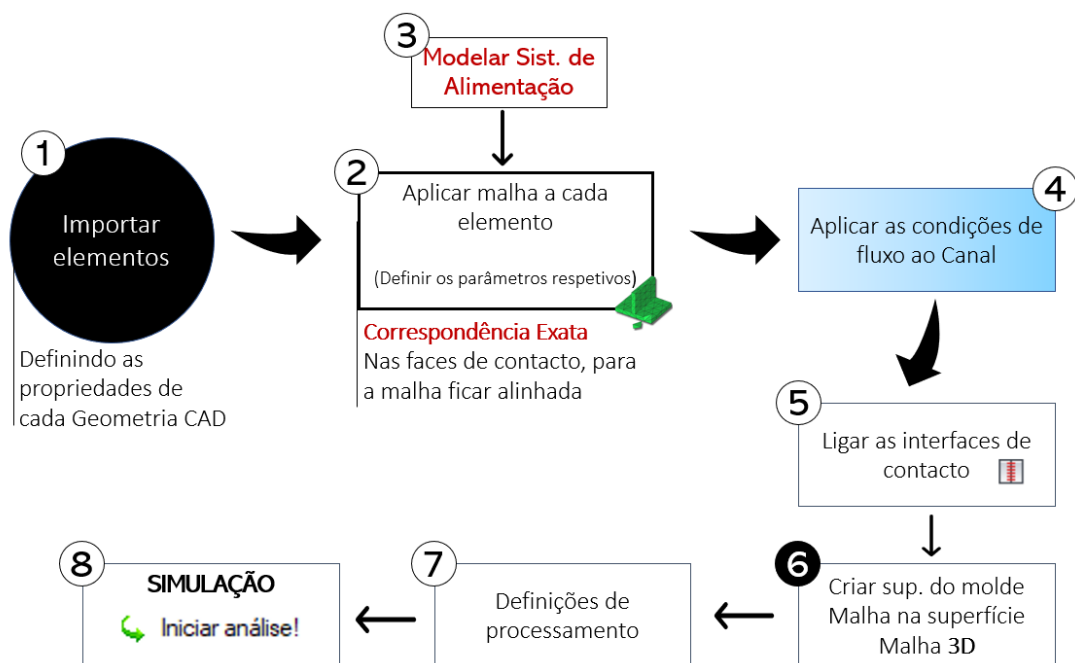


Figura 38 - Procedimento geral em AMI®

Com base nestas opções, a selecionada para o estudo que será desenvolvido foi a Transiente no ciclo, pois é necessária uma análise que possibilite observar as variações de temperatura, como regiões mais quentes (zonas de estagnação térmica) ou mais frias com detalhe e precisão. Este mapeamento térmico não consegue ser obtido pela análise Média do ciclo, que devolve uma temperatura média. E ainda que uma análise transiente desde o arranque fosse interessante, o estudo desta dissertação é mais direcionado para a peça, pelo que o estudo desenvolvido será apenas relativo a um único ciclo.

Em oito passos é sistematizado todo o procedimento em AMI® realizado para cada caso de estudo, permitindo assim uma simplificação que realça as diferenças e as especificidades de cada caso, não se efetuando repetições desnecessárias.

Assim, de seguida, são detalhados todas estas características segundo o referido anteriormente.

5.1. Sistema de canais convencionais

Este caso tem por base aquela que é uma das configurações de sistemas de refrigeração mais simples de ser implementada. Os canais são paralelos em 'Z' e foram utilizados os valores obtidos no dimensionamento do sistema de arrefecimento em **0**.

Neste caso apenas foi importada a peça, à qual foi atribuído o sistema de alimentação. O sistema de arrefecimento foi incorporado com recurso ao assistente do programa em causa, tendo sido introduzidas as dimensões pretendidas. Os canais de apenas uma dimensão (1D) foram prolongados em cerca de 50 mm de modo a ultrapassarem ligeiramente a superfície do molde, tendo sido atribuídas as condições já mencionadas ao fluído circulante (ver **Figura 39**).

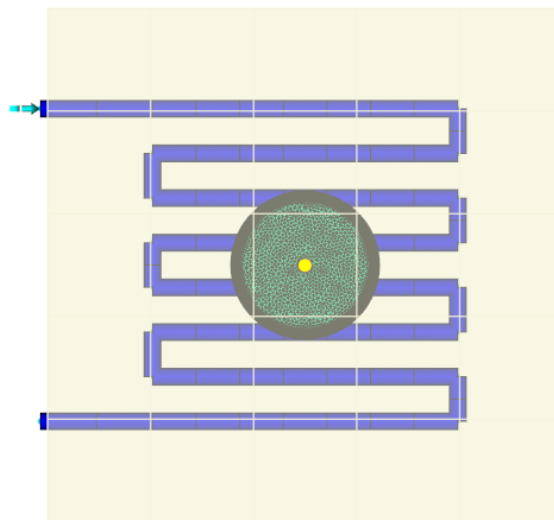


Figura 39 - Vista superior da disposição dos componentes na geometria de arrefecimento do caso de estudo 5.1

A malha de superfície foi criada e não tendo sido verificados quaisquer erros/problemas (lados livres, lados *manifold*, elementos não orientados corretamente ou interseções) e as razões de aspeto estarem de acordo com os valores recomendados, procedeu-se à criação da malha 3D [69].

A malha do molde obtida tem as seguintes características, especificadas na **Tabela 9**.

Tabela 9 – Estatísticas da malha do molde do caso de estudo 5.1

Propriedade		Valor
Número de entidades- tetraedros		1962172
Número de nós ligados		353175
Razão de aspeto	Máxima	54,21
	Média	3,12
	Mínima	1,01
Ângulo diédrico máximo		174,50

Os valores obtidos nas estatísticas da malha tetraédrica do molde obedecem aos recomendados para uma malha deste tipo, assim, após serem definidas as condições de processamento, é iniciada a análise [69, 77].

5.2. Sistema de canais com lâminas separadoras

Este caso de estudo, resulta de uma configuração semelhante à anterior, com um desenvolvimento dos canais para lâminas separadoras na região sob a peça. Esta alteração, permite uma extração de calor da bucha com uma maior proximidade da peça, uma vez que estes elementos percorrem a bucha na sua componente vertical. Então, foram introduzidos 4 destes dispositivos de extração de calor, estando dispostos numa configuração em série. O diâmetro destas foi de 10 mm, uma vez que o seu diâmetro incorpora 2 fluxos de fluido (um ascendente e outro descendente), e é o valor normalizado mais próximo do selecionado para os canais. Este ligeiro incremento permite um maior volume da bucha abrangido.

Ainda que a área da seção transversal de cada sentido da lâmina seja ligeiramente inferior à dos canais, esta ligeira diminuição permite uma variação na velocidade do fluxo, o que faz aumentar o número de *Reynolds* nesta região, o que favorece também a extração de calor.

O dimensionamento do restante sistema teve em consideração uma equidistância entre as lâminas separadoras e entre estas e as paredes do copo. A **Figura 40** permite uma melhor visualização do descrito.

Como é óbvio, esta distância à parede da peça não é constante devido ao perfil da mesma. Relativamente à sua altura, de acordo com as regras de projeto deste componente, foi respeitada a regra de uma distância de meio diâmetro do canal de acordo com [78].

Ainda relativo às propriedades da lâmina, para além de definido o diâmetro de 10mm, foi definida a eficácia de transferência de calor em 0,5, estando este último de acordo com o procedimento do respetivo programa com a mesma referência [78].

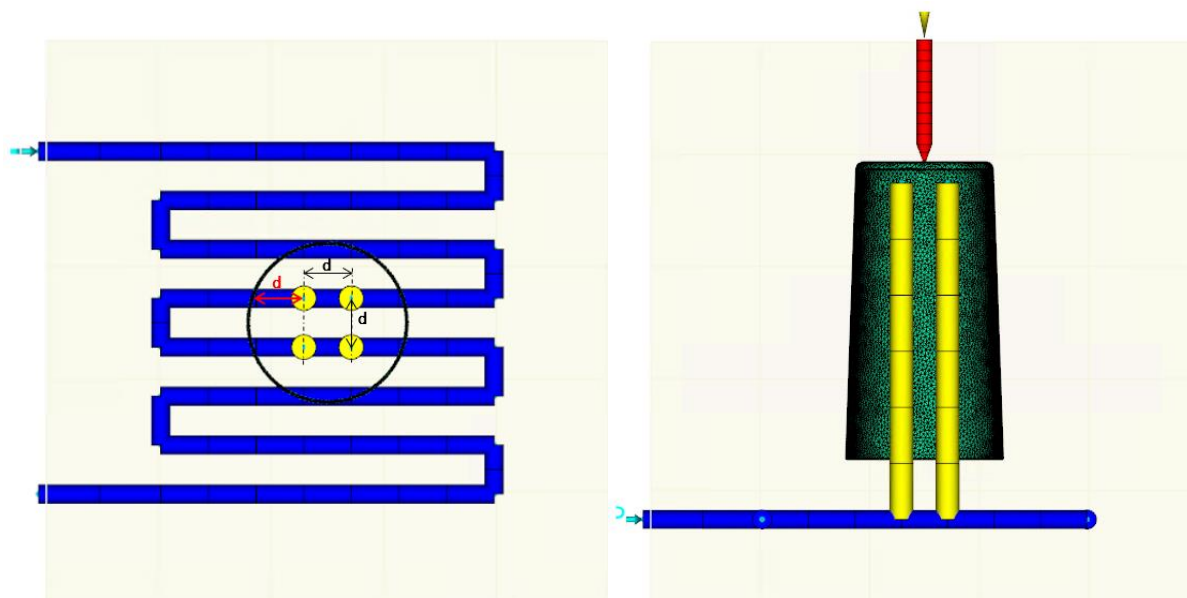


Figura 40 – Vista superior (esquerda) e vista de lado em corte(direita) da disposição do sistema de arrefecimento do caso de estudo 5.2 com lâminas separadoras (a amarelo) no molde e distâncias ao bordo da peça (a vermelho) e entre si (a preto) correspondentes

A malha de superfície foi criada e não tendo sido verificados quaisquer erros/problemas (lados livres, lados *manifold*, elementos não orientados corretamente ou interseções) e as razões de aspeto estarem de acordo com os valores recomendados, procedeu-se à criação da malha 3D [69].

A malha do molde obtida tem as seguintes características, especificadas na **Tabela 10**.

Os valores obtidos nas estatísticas da malha tetraédrica do molde obedecem aos recomendados para uma malha deste tipo, assim, após serem definidas as condições de processamento, é iniciada a análise [69, 77].

Tabela 10 - Estatísticas da malha do molde do caso de estudo 5.2

Propriedade		Valor
Número de entidades- tetraedros		2176775
Número de nós ligados		402158
Razão de aspeto	Máxima	32,33
	Média	3,24
	Mínima	1,00
Ângulo diédrico máximo		172,9

5.3. Sistema de canais com o núcleo de refrigeração/sistemas borbulhantes

Este caso de estudo é praticamente igual ao anterior, com a alteração das lâminas separadoras, que foram substituídas pelos sistemas borbulhantes com núcleo de refrigeração. Esta arquitetura manteve a configuração em série e também as distâncias entre si e em relação às paredes da peça que o anterior (ver **Figura 41**).

A sua composição assenta, conforme já referido, num canal centrado interior a um furo no molde, este permite ao fluído atingir as zonas superiores deste furo, onde cria turbulência como um ‘chafariz’ e depois percorre este furo do seu topo até ao canal de saída. Para se proporcionar um arrefecimento mais eficaz, deve ser garantido que a resistência do escoamento em cada uma destas secções (no canal interior e no furo) é igual, sendo a condição para isso, diâmetro interior/diâmetro exterior=0,707 [79]. Desse modo, atribuiu-se ao canal interior o mesmo diâmetro do sistema de canais convencionais (8mm) e ao exterior cerca de 12 mm. Conforme a lâmina separadora, também este não mantém uma distância constante à peça, devido ao seu perfil. Mas no que concerne a altura e de acordo com as regras de projeto deste componente, foi respeitada a regra de uma distância de meio diâmetro do canal à peça, de acordo com [80].

Relativamente às restantes propriedades deste componente, para além de definidos os diâmetros, foi definida a eficácia de transferência de calor em 0 ao canal interior e 1 para o canal exterior (de maior diâmetro, que representa a dimensão do furo onde o sistema borbulhante está colocado) estando este último de acordo com o procedimento do respetivo programa com a mesma referência.

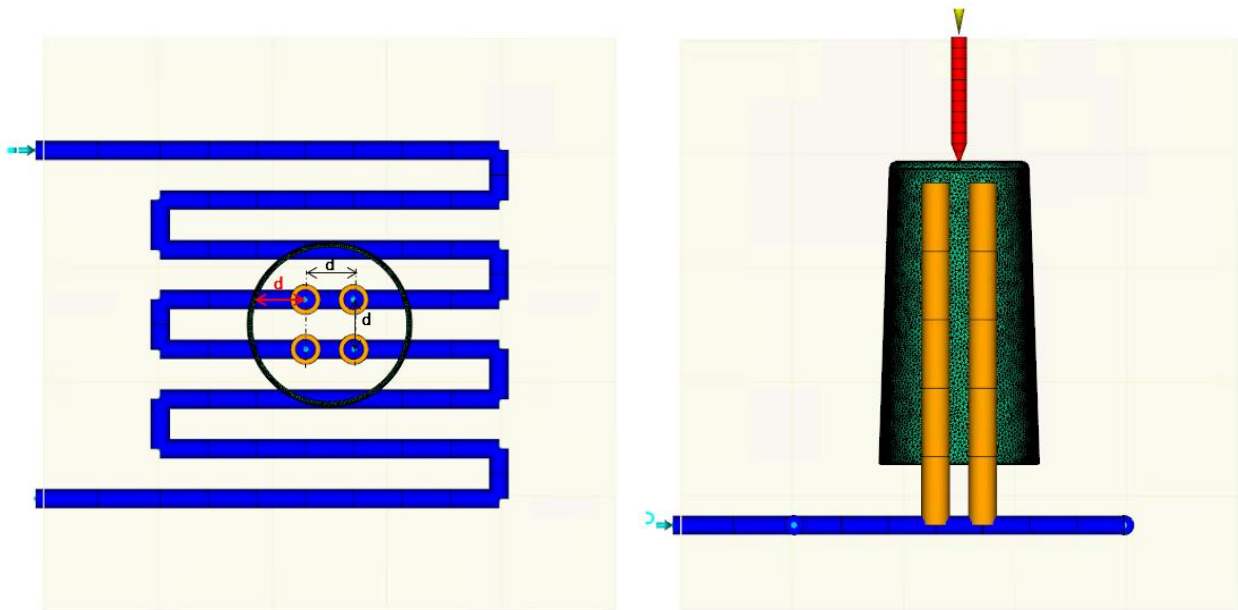


Figura 41 - Vista superior (esquerda) e vista de lado em corte(direita) da disposição do sistema de arrefecimento do caso de estudo 5.3 com núcleo de refrigeração (a laranja) no molde e distâncias ao bordo da peça (a vermelho) e entre si (a preto) correspondentes

A malha de superfície foi criada e não tendo sido verificados quaisquer erros/problemas (lados livres, lados *manifold*, elementos não orientados corretamente ou interseções) e as razões de aspeto estarem de acordo com os valores recomendados, procedeu-se à criação da malha 3D [69].

A malha do molde obtida tem as seguintes características, especificadas na **Tabela 11**.

Os valores obtidos nas estatísticas da malha tetraédrica do molde obedecem aos recomendados para uma malha deste tipo, assim, após serem definidas as condições de processamento, é iniciada a análise [69, 77].

Tabela 11 - Estatísticas da malha do molde do caso de estudo 5.3

Propriedade		Valor
Número de entidades- tetraedros		1844443
Número de nós ligados		338449
Razão de aspeto	Máxima	29,78
	Média	2,85
	Mínima	1,01
Ângulo diédrico máximo		173,9

5.4. Inserto de alta condutividade térmica (AMPCO 940®)

De modo a avaliar a influência da utilização de diferentes materiais no molde, desenvolveu-se este caso de estudo com um inserto (postigo) de um material de elevada condutividade térmica. Especificamente, foi selecionada uma liga de cobre para aplicar ao inserto referido em 4.11. A liga de cobre escolhida foi a liga AMPCO 940® pois dispõe de uma relação condutividade térmica/dureza elevada, está disponível na lista de materiais para insertos de molde do AMI® e é referenciada frequentemente na literatura [76].

As suas propriedades são apresentadas de seguida na **Tabela 12**.

Tabela 12 - Valores utilizados para o inserto do molde (AMPCO 940®) [76]

Propriedades	Valores Típicos
Densidade [kg/m ³]	8.710,000
Módulo de <i>Young</i> [MPa]	131.000,000
Coefficiente de <i>Poisson</i>	0,310
Limite de elasticidade [MPa]	500,000
Resistência à tração [MPa]	650,000
Calor específico [J/kg °C]	380,000
Condutividade térmica [W/m °C]	208,000
Coefficiente de expansão térmica [1/°C]	$1,750 \times 10^{-5}$

Conforme se pode concluir face aos valores apresentados previamente no material do molde, a condutividade aumenta em 7 vezes, mas por outro lado, a sua resistência mecânica diminui consideravelmente como é perceptível pela variação dos parâmetros associados. Esta redução já era prevista, apesar de ter sido selecionada uma das ligas com maior dureza, e é o parâmetro mais determinante na sua utilização e seleção.

Este caso de estudo subdivide-se em outros dois:

5.4.1. Inserto com linha de água interior

Este cenário permite estudar a conjugação entre a elevada condução do inserto e a convecção (forçada) do fluído de arrefecimento, sendo esta feita no interior do mesmo. A linha de água interior com estrutura em 'V' no respetivo inserto é realizada com recurso a furação (processo convencional). Na placa da bucha, o canal de arrefecimento exterior ao inserto, tem uma configuração semelhante às anteriores (sistema de canais convencionais, mas com apenas 7 canais paralelos). O sistema de arrefecimento tem a configuração exposta na **Figura 42** (desenho completo no **ANEXO G**) onde são também visíveis as dimensões do mesmo. No que concerne a distância à peça, foi deixada uma distância mínima equivalente ao diâmetro do canal, embora seja uma distância ligeiramente inferior à sugerida, optou-se por uma aproximação ligeira àquela que é a região mais crítica da peça (a sua base, na região de injeção) [18].

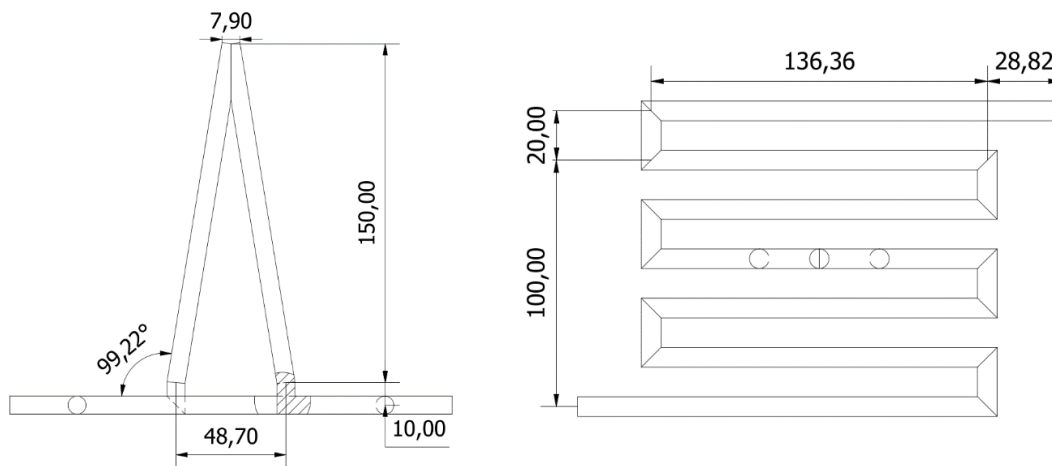


Figura 42 – Vista de lado (esquerda) e vista de cima (direita) do canal de arrefecimento do caso de estudo 5.4.1

Aos três elementos (inserto, canal e peça) foi aplicada uma malha tendo em conta as interfaces de contacto (ver **Figura 43**), de forma aos respetivos nós terem uma correspondência exata de modo aos resultados serem o mais precisos possível em matéria de transferência de calor ao longo destas mesmas superfícies [81].

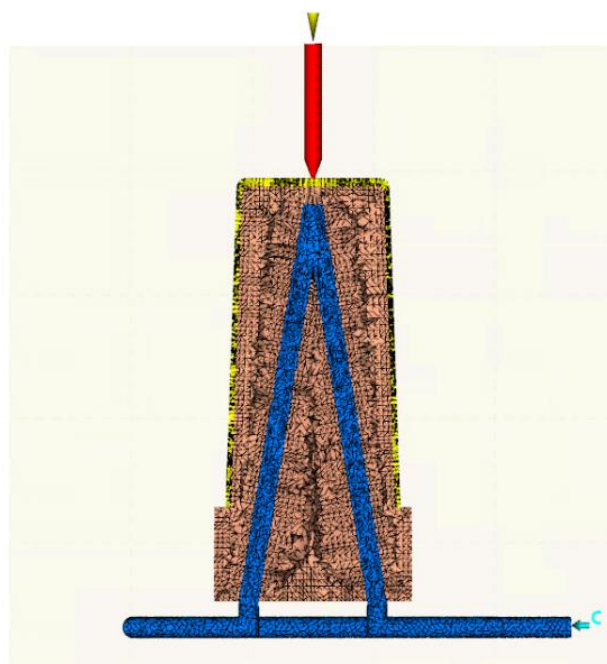


Figura 43 – Vista de lado em corte (malha 3D) da disposição do sistema de arrefecimento do caso de estudo 5.4.1 com canal de arrefecimento (a azul), inserto (a laranja) e peça (a amarelo)

Relativamente à malha aplicada ao inserto e ao canal, esta será apresentada de seguida na **Tabela 13** e **Tabela 14** , respetivamente.

Tabela 13 - Estatísticas da malha do inserto do caso de estudo 5.4.1

Propriedade		Valor
Número de entidades- tetraedros		519058
Número de nós ligados		95308
Razão de aspeto	Máxima	26,83
	Média	2,59
	Mínima	1,06
Ângulo diédrico máximo		172,8

Tabela 14 - Estatísticas da malha do canal 3D do caso de estudo 5.4.1

Propriedade		Valor
Número de entidades- tetraedros		183122
Número de nós ligados		37309
Razão de aspeto	Máxima	18,21
	Média	2,44
	Mínima	1,08
Ângulo diédrico máximo		168,2

À semelhança da análise que tem vindo a ser realizada aquando da aplicação de uma malha tridimensional, a mesma foi feita para estes dois componentes, estando as estatísticas da malha tetraédrica de acordo com os valores recomendados para uma malha com estas características [69, 77]

Posto que a malha do canal é tetraédrica e não é composta por barras como nos casos anteriores, não é possível selecionar um número de *Reynolds* específico. Assim, para garantir o valor previamente estipulado de 10000, recorreu-se à equação **(10)** para determinar o caudal necessário para num canal com esta dimensão, este valor ser assegurado. Nesse sentido, foi determinado que para um caudal de 20 l/min de água (à temperatura em estudo), este valor seria atingido.

Com base no exposto, o caudal do fluído de arrefecimento neste caso de estudo foi estabelecido em 20 l/min com uma temperatura de 90°C.

Após estes parâmetros estarem definidos, ligaram-se as interfaces de contacto, ou seja, ligaram-se as superfícies cujos nós foram previamente alinhados, para que na etapa da criação da malha da superfície do molde (e posteriormente da malha tridimensional do molde) estas superfícies não criem ambiguidade umas para com as outras. Assim, esta ferramenta permite diferenciar as superfícies que fazem parte da cavidade moldante, das que apenas têm contacto dentro dessa mesma cavidade [82]. Neste caso, a superfície interior do molde irá envolver a peça (tal como na prática a cavidade), mas não cria uma superfície entre o inserto e o canal na zona em que contactam, pois esta na verdade não existe.

A malha de superfície foi criada e não tendo sido verificados quaisquer erros/problemas (lados livres, lados *manifold*, elementos não orientados corretamente ou interseções) e as razões de aspeto estarem de acordo com os valores recomendados, procedeu-se à criação da malha 3D [69].

De realçar que os extremos do canal de arrefecimento, ou seja, a saída e entrada do canal, não ultrapassam a superfície do molde (como nos casos estudados até agora), conforme é possível ver na **Figura 43**. Esta alteração resulta da incompatibilidade com o

canal em estudo, pois cria interferência com a malha da superfície do molde (uma vez que ambos têm uma malha tetraédrica aplicada), assim a solução encontrada foi manter estes extremos interiores à superfície mencionada. Para o valor desta distância foi selecionado 18 mm, que é o valor da altura da caixa para o *record* (acessório simples de ligação de sistemas de refrigeração que, numa extremidade, tem uma rosca para ligar ao furo roscado da placa do molde e na outra extremidade pode ter um acoplamento para uma mangueira flexível, um sistema de engate rápido ou uma rosca) para o diâmetro do canal utilizado, e portanto, o canal de arrefecimento, na prática, é parte integrante do molde com a sua função a partir dessa distância da sua superfície [14, 83].

A malha do molde obtida tem as seguintes características, especificadas na **Tabela 15**. Os valores obtidos nas estatísticas da malha tetraédrica do molde obedecem aos recomendados para uma malha deste tipo, assim, após serem definidas as condições de processamento, é iniciada a análise [69, 77].

Tabela 15 - Estatísticas da malha do molde do caso de estudo 5.4.1

Propriedade		Valor
Número de entidades- tetraedros		1187676
Número de nós ligados		217634
Razão de aspeto	Máxima	30,15
	Média	2,82
	Mínima	1,01
Ângulo diédrico máximo		173.1

5.4.2. Sistema de canais convencionais com inserto

Esta segunda vertente do estudo, por outro lado, permite estudar a conjugação entre a condução e convecção, mas esta última é realizada com recurso a um sistema de canais convencionais (semelhantes ao do caso de estudo **5.1**), sem qualquer arrefecimento interior da bucha. A única diferença face aos canais do caso de estudo **5.1** é a distância destes à peça, que foi incrementada de forma a distanciar 10mm da base do inserto (perfazendo 45 mm da peça).

Aos dois elementos (inserto e peça) foi-lhes aplicada uma malha tendo em conta as interfaces de contacto, de forma aos respetivos nós terem uma correspondência exata de modo aos resultados serem o mais precisos possível em matéria de transferência de calor ao longo destas mesmas superfícies [81]. A malha aplicada ao inserto é apresentada de seguida na **Tabela 16**.

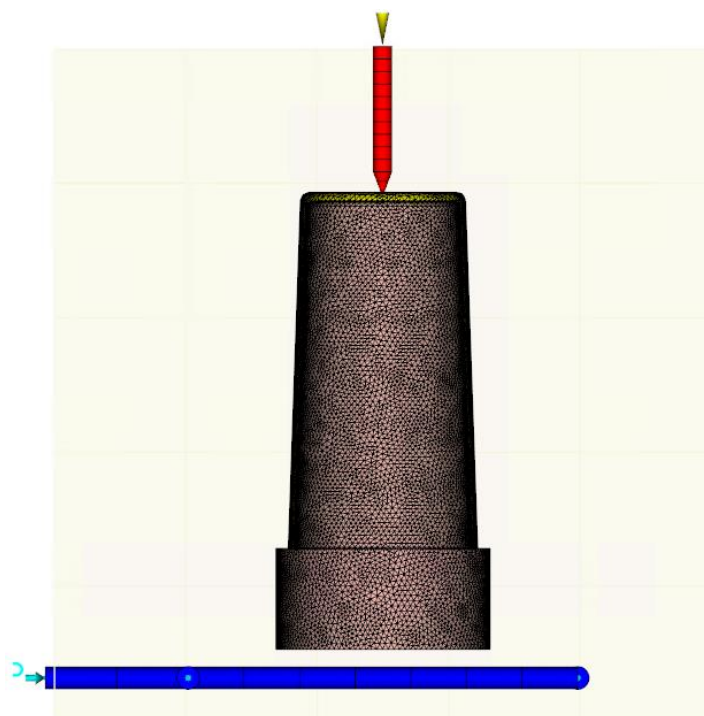


Figura 44 - Vista de lado em corte da disposição do sistema de arrefecimento do caso de estudo 5.4.2 com sistema de canais convencionais (a azul), inserto (a laranja) e peça (a amarelo)

Tabela 16- Estatísticas da malha do inserto do caso de estudo 5.4.2

Propriedade		Valor
Número de entidades- tetraedros		547748
Número de nós ligados		97356
Razão de aspeto	Máxima	54,27
	Média	3,19
	Mínima	1,05
Ângulo diédrico máximo		175,7

À semelhança da análise que tem vindo a ser realizada aquando da aplicação de uma malha tridimensional, também para este a mesma foi feita, estando as estatísticas da malha tetraédrica de acordo com os valores recomendados para uma malha com estas características [69, 77]

As interfaces de contacto foram ligadas, ou seja, conectaram-se as superfícies cujos nós foram previamente alinhados, para que na etapa da criação da malha da superfície do molde (e posteriormente da malha tridimensional do molde) estas superfícies não criem ambiguidade umas para com as outras [82]. Neste caso, a superfície interior do molde irá envolver a peça, juntamente com o inserto.

A malha de superfície foi criada e não tendo sido verificados quaisquer erros/problemas (lados livres, lados *manifold*, elementos não orientados corretamente ou interseções) e as razões de aspeto estarem de acordo com os valores recomendados, procedeu-se à criação da malha 3D [69].

A malha do molde obtida tem as seguintes características, especificadas na **Tabela 17**.

Os valores obtidos nas estatísticas da malha tetraédrica do molde obedecem aos recomendados para uma malha deste tipo, assim, após serem definidas as condições de processamento, é iniciada a análise [69, 77].

Tabela 17- Estatísticas da malha do molde do caso de estudo 5.4.2

Propriedade		Valor
Número de entidades- tetraedros		1434056
Número de nós ligados		263193
Razão de aspeto	Máxima	41,72
	Média	2,91
	Mínima	1,00
Ângulo diédrico máximo		173,1

5.5. Sistema de canais conformais

O mais importante e vital caso de estudo no âmbito desta dissertação, a geometria conformal, será explanado seguidamente. Este foi desenvolvido no sentido de tentar colmatar os desafios que a peça tem e que as restantes geometrias não conseguem solucionar.

Primeiramente, houve um processo para avaliar, de entre as possibilidades de arquitetura conformal, qual se adaptaria melhor à peça em questão. Essas possibilidades eram inúmeras e alguns exemplos são: perfis finos em “U”, perfis em “U” alhetados, perfis em espiral, perfis com sistema borbulhante (ver **Figura 45**) para além de todas as possibilidades de envolver a peça como, estruturas construídas por ramificações múltiplas (tipo uma malha), estruturas em *Zig-Zag*, estruturas baseadas no diagrama de *Voronoi* [21, 84]

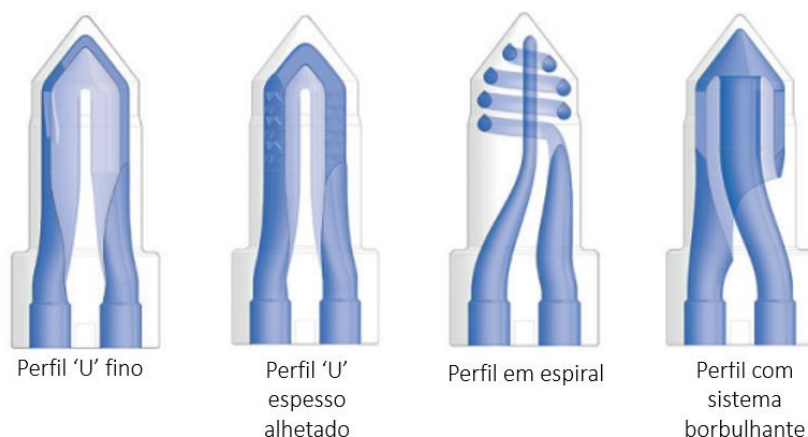
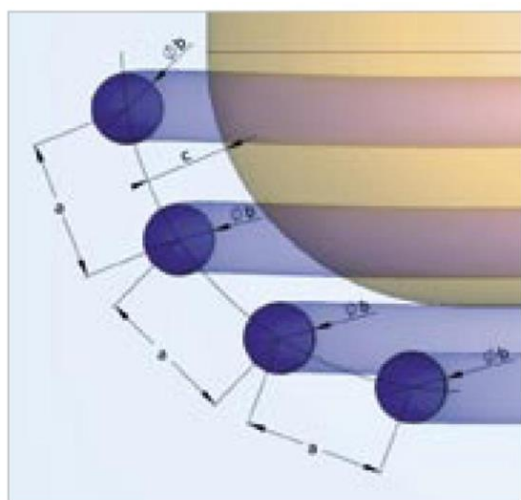


Figura 45 - Exemplos de tipologia de canais conformais – adaptada de [84]

Assim sendo, foi selecionada uma geometria com perfil em espiral de uma secção constante (um perfil circular). Esta escolha foi decorrente da sua facilidade de aplicação, da menor perda de carga, da velocidade na tipologia do perfil circular (relativamente aos outros perfis) e também devido a ser o mais comum face à bibliografia consultada para peças do tipo da abordada. O aspeto anteriormente mencionado e referente à perda de carga é de uma importância elevada no contexto do arrefecimento. Adicionalmente, um canal constituído por uma elevada área superficial de arrefecimento (e reduzida espessura) produz uma heterogeneidade térmica nessa mesma área resultando em regiões de estagnação do fluido mais quentes e com uma eficiência de remoção de calor muito baixa.

Após definir o tipo de geometria, foi necessário encontrar as regras para o projeto de canais conformais. Com esse fim, após um levantamento da bibliografia relevante, chegou-se à **Figura 46** originária do estudo de Mayer et al. [85]. Esta tem em vista o *design* otimizado de um sistema de canais tridimensionais com base num conjunto de regras pelas relações entre as várias variáveis associadas a estes canais.



Espessura da parede da peça [mm]	Diâmetro do canal [mm] b	Distância entre o centro dos canais [mm] a	Distância entre o centro dos canais e a cavidade [mm] c
0 - 2	4 - 8	$2 - 3 \times b$	$1.5 - 2 \times b$
2 - 4	8 - 12	$2 - 3 \times b$	$1.5 - 2 \times b$
4 - 6	12 - 14	$2 - 3 \times b$	$1.5 - 2 \times b$

Figura 46 - Distâncias relativas ao design de um sistema de canais tridimensionais ótimo em elementos moldantes – adaptada de [85]

Com base nestas relações e nas características da peça, obtiveram-se os valores explicitados na **Tabela 18**. Note-se que foi selecionado um valor intermédio da gama disponível para o coeficiente da distância entre o centro dos canais, de forma a não ser um valor extremo. Já na gama disponível para o coeficiente da distância dos canais à cavidade foi selecionado o mínimo de forma a promover um melhor arrefecimento.

Tabela 18 - Parâmetros do sistema de canais conformais

	Relação	Dimensão [mm]
diâmetro do canal b	-	8
distância entre o centro dos canais a	$2,5 \times b$	20
distância entre o centro dos canais e a cavidade c	$1,5 \times b$	12

O sistema de canais conformais agora completamente definido foi modelado num *software* CAD, e a sua representação encontra-se na **Figura 47** bem como as suas dimensões mais relevantes (o desenho na sua íntegra pode ser consultado no **ANEXO H**). Todas os parâmetros foram cumpridos na modelação do canal.

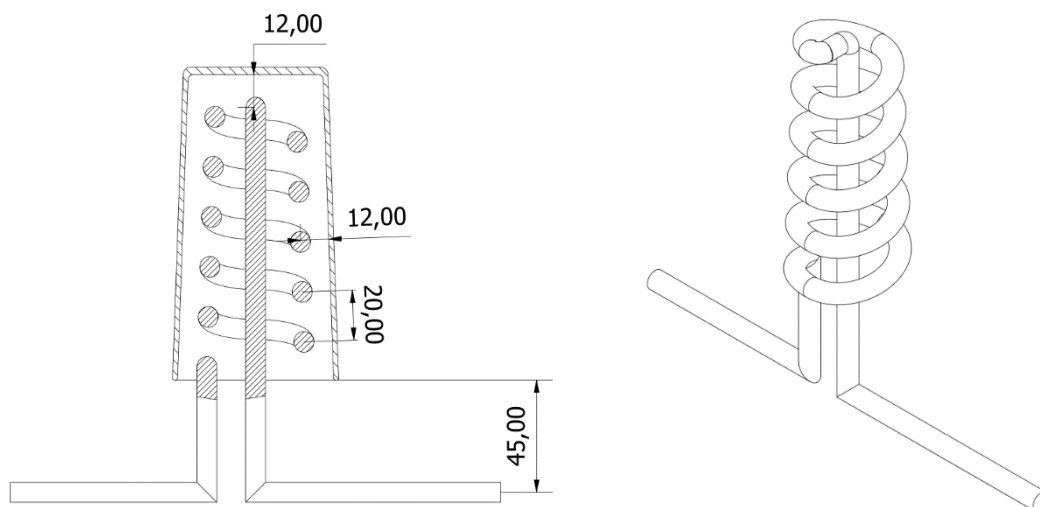


Figura 47 - Vista de lado (esquerda) e perspectiva (direita) do sistema de canais conformais (caso de estudo 5.5)

Agora em ambiente AMI®, foi aplicada uma malha ao conjunto formado pelo sistema de canais conformais e a peça, e ainda que não estejam em contacto, é necessário um alinhamento preciso para que a distância do canal às diferentes faces da peça seja cumprida.

À semelhança da análise que tem vindo a ser realizada aquando da aplicação de uma malha tridimensional, a mesma foi feita para estes dois componentes, estando as estatísticas da malha tetraédrica, da **Tabela 19**, de acordo com os valores recomendados para uma malha com estas características [69, 77]

À semelhança do caso de estudo 5.4.1, a malha do sistema de canais conformais também é tetraédrica e na impossibilidade de selecionar um número de *Reynolds* de 10000, utilizou-se um caudal de 20 l/min de água (à temperatura de 90°C) para garantir o mesmo. Ainda dentro deste ponto, e face à não simetria do canal, foi testado o sentido do fluído conforme a **Figura 48** expõe e com o sentido inverso (extremidade do canal definida como entrada, do lado direito da mesma imagem, torna-se saída) para avaliar qual a que permite obter melhores resultados de tempo de ciclo e uniformidade térmica.

A malha de superfície do molde foi criada e não tendo sido verificados quaisquer erros/problemas (lados livres, lados *manifold*, elementos não orientados corretamente ou interseções) e as razões de aspeto estarem de acordo com os valores recomendados, procedeu-se à criação da malha 3D [69].

De realçar que, e à semelhança do caso de estudo 5.4.1, os extremos do canal de arrefecimento, ou seja, a saída e entrada do canal, não ultrapassam a superfície do molde conforme é possível ver na **Figura 48**. Esta alteração resulta da interferência da malha do canal com a malha da superfície do molde, pelo que a solução encontrada foi manter estes extremos interiores à superfície mencionada. Para o valor desta distância foi selecionado 18 mm, que novamente, é o valor da altura da caixa para o *record* (acessório simples de ligação

de sistemas de refrigeração conforme já mencionado) para o diâmetro do canal utilizado [14, 83].

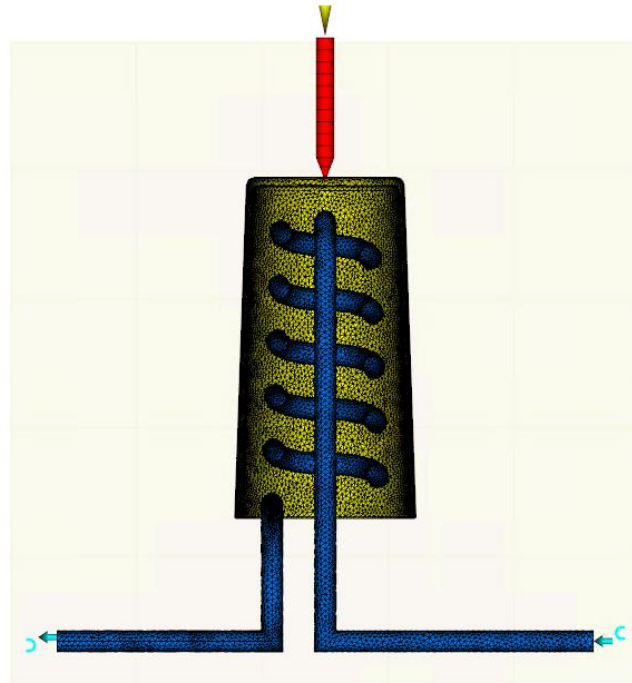


Figura 48 - Vista de lado em corte da disposição do sistema canais conformais do caso de estudo 5.5 com canal de arrefecimento (a azul) e peça (a amarelo)

Tabela 19 - Estatísticas da malha do sistema de canais conformais (caso de estudo 5.5)

Propriedade		Valor
Número de entidades- tetraedros		510323
Número de nós ligados		96152
Razão de aspeto	Máxima	32,32
	Média	5,27
	Mínima	1,00
Ângulo diédrico máximo		170,6

A malha do molde obtida tem as seguintes características, especificadas na **Tabela 20**. Note-se que estes valores resultam de uma reparação da malha pois os obtidos anteriormente ultrapassavam os recomendados com uma discrepância excessiva. Assim os valores obtidos nas estatísticas da malha tetraédrica do molde obedecem aos recomendados para uma malha deste tipo, exceto a razão de aspeto máxima cujo valor ultrapassa ligeiramente o valor recomendado. No entanto esta diferença é muito reduzida e é perfeitamente aceitável, ainda mais face aos valores da estatística da malha anteriormente obtidos [69, 77].

Assim e após serem definidas as condições de processamento, é iniciada a análise.

Tabela 20 - Estatísticas da malha do molde do caso de estudo 5.5

Propriedade		Valor
Número de entidades- tetraedros		1450762
Número de nós ligados		268905
Razão de aspeto	Máxima	111,51
	Média	3,13
	Mínima	1,03
Ângulo diédrico máximo		177,9

(Esta página foi intencionalmente deixada em branco)

6. Discussão de Resultados

Após terem sido realizadas, de acordo com todos os procedimentos anteriormente detalhados, as simulações para cada caso de estudo, obtiveram-se os resultados que serão apresentados e discutidos neste capítulo. Como é óbvio, apenas serão apresentados os resultados de maior relevância no âmbito do tema desta dissertação. Assim sendo, e indo também ao encontro do exposto no estado da arte, os resultados analisados foram os de seguida expostos. No que concerne a análise de arrefecimento, foram avaliados os resultados do tempo até atingir os critérios de extração e a distribuição térmica. Neste último, foi avaliada a temperatura do molde e da peça em modo transiente.

Relativamente à análise de empeno, foram avaliados os resultados da deflexão, especificamente pelo efeito do arrefecimento diferencial e pela contração diferencial, ambos pelas diferentes componentes que os constituem (segundo X, Y e Z).

Esta abordagem permite uma análise comparativa das diferentes soluções utilizadas que serão apresentadas de seguida.

6.1. Arrefecimento

6.1.1. Tempo até atingir os critérios de extração

Designa-se por tempo de extração o tempo requerido para a peça atingir a temperatura de extração e um determinado nível de solidificação expresso em percentagem, segundo os critérios previamente definidos em **4.6**. Apenas quando são garantidos estes três critérios é que a peça é definida como pronta para ser extraída. No tempo para atingir os critérios de extração, está incluído o tempo de enchimento (aproximadamente 1,48s), o tempo de compactação (10s) e o tempo de arrefecimento. O gráfico da **Figura 49** apresenta os valores obtidos para cada caso de estudo.

Conforme já se antevê, o detalhe geométrico da peça que será mais problemático em termos de arrefecimento é a base do copo, devido à sua espessura mais elevada e por ser o ponto mais distante da base da bucha, o que em algumas geometrias trará desvantagens, no sentido de tempos de arrefecimento mais elevados. Também a superfície exterior do copo se antevê que tenha um tempo até atingir a temperatura de extração inferior, e este tempo é tanto maior quanto menor for a diferença de temperatura entre o polímero latente e a cavidade moldante, pelo que a distância ao circuito de arrefecimento tem aqui uma importância clara nestes valores.

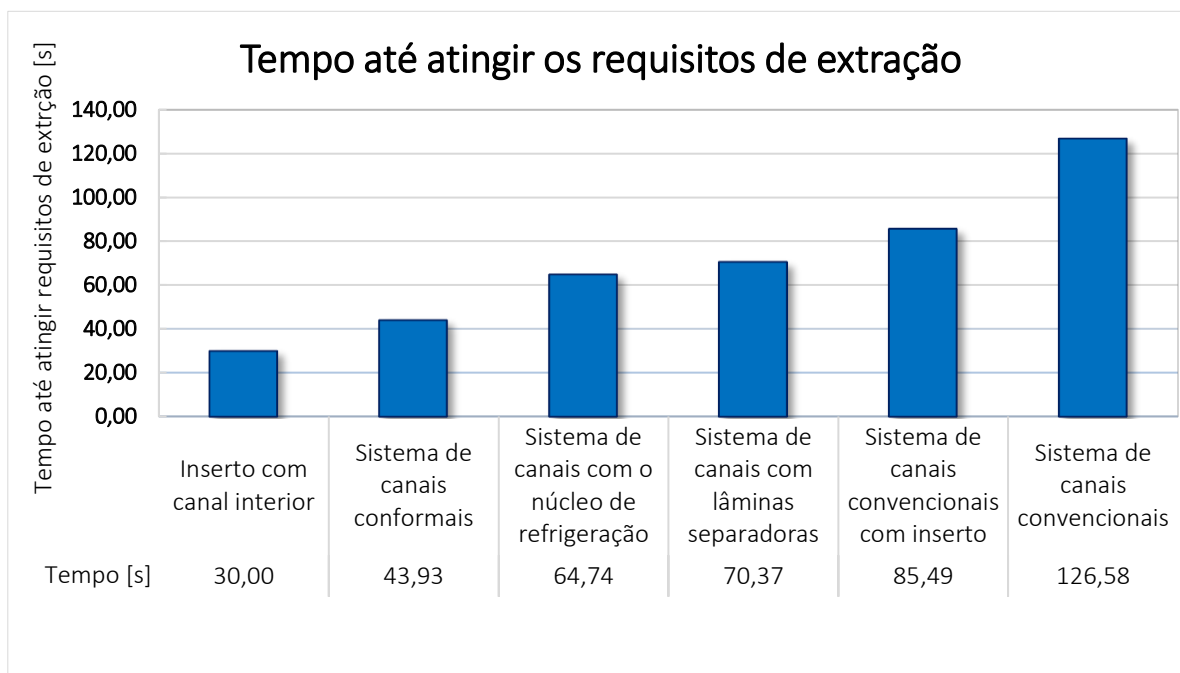


Figura 49 - Gráfico do tempo para atingir os critérios de extração pelas diferentes arquiteturas de arrefecimento

Com base nos resultados obtidos, é possível concluir que o tempo mais baixo foi conseguido pela arquitetura de conjuga a condução e a convecção com recurso a um inserto de alta condutividade térmica e uma linha de água no seu interior. Por outro lado, e como já seria espectável, o maior tempo foi alcançado pelo sistema de canais convencionais. Com o sistema de canais conformais (**Figura 48**) foi atingido o segundo tempo mais baixo, com uma diferença de 14 segundos em contraste com o conseguido pelo sistema de canais com o núcleo de refrigeração, com uma diferença de 34s. Isto apenas para referir que se apenas fossem utilizados os sistemas de arrefecimento mais comuns, segundo estas condições, ter-se-iam tempos muito elevados em relação aos obtidos por sistemas mais complexos.

Em comparação com o sistema de canais convencionais, o sistema de canais conformais permite uma redução de 65% no tempo de arrefecimento enquanto a solução com o inserto com canal interior reduz o mesmo em 76%. Não menos importante, o inserto com o canal interior permite uma redução deste tempo em 54% face ao sistema de canais com o núcleo de refrigeração, que é o caso de estudo com a implementação de um sistema tradicionalmente utilizado pela indústria.

Uma conclusão que já era de esperar, reside na diminuição do tempo de arrefecimento obtido com as arquiteturas onde o canal percorre o interior da bucha comparativamente com os restantes sistemas de arrefecimento estudados. Essa diferença é mais notória, dada a semelhança das configurações, no inserto com canal interior e no sistema de canais convencionais com inserto. Em termos proporcionais, o sistema de canais convencionais com inserto tem associado um tempo de extração que é aproximadamente o

triplo em comparação com o tempo de extração de uma peça com o inserto com canal interior.

Salienta-se assim a distinção dos resultados que se deve à variação das configurações dos sistemas de arrefecimento tendo sempre presente que a peça, bem como todas as condições (de processamento e de extração) são as mesmas. Evidentemente que não é tido em conta a dificuldade ou o custo para proceder à realização prática de cada estratégia diferente, mas este seria um dos fatores determinantes na sua seleção.

Outro ponto que é importante referir está relacionado com os tempos em estudo serem demasiado elevados, ou seja, para uma peça com a dimensão e complexidade da estudada, o menor tempo (30s) é o mais razoável e plausível do ponto de vista prático. Como já foi referido, o tempo de extração depende das condições de extração, ou seja, a peça apenas é definida como pronta para ser extraída quando são garantidas as condições previamente definidas (atingir a temperatura desejada da superfície de molde, 100°C, a peça atingir a temperatura de extração, 125°C, e a percentagem mínima solidificada a esta mesma temperatura, 100%) enquanto que na prática, a peça pode ser extraída sem que o volume solidificado seja de 100%. A peça é extraída quando: é garantido que consegue suportar as forças de extração sem que lhe seja provocada qualquer deformação; está em condições de manter a sua forma após lhe ser removidas todas as restrições impostas pelo molde; cumpre todos os requisitos estruturais e estéticos no final do processo de arrefecimento, ou seja, aquando da sua completa solidificação.

Ainda que tempo de extração seja um dos principais indicadores, é necessário complementar com os resultados posteriores que auxiliarão conclusões mais sólidas, nunca desvinculando a importância deste naquele que é o ciclo produtivo da peça.

6.1.2. Distribuição de temperatura

No que diz respeito à distribuição de temperaturas, foi selecionado um intervalo de tempo de 28,63s, para efetuar uma comparação entre as temperaturas do molde e da peça em todas as configurações estudadas com recurso a uma análise transiente. Este valor resulta de uma simulação em modo transiente da evolução da temperatura do sistema, do qual se concluiu que a peça já atingiu a temperatura de extração ainda que exista uma região muito pequena no meio da peça sob o ataque que ainda não solidificou e tem uma temperatura mais elevada um grau, sendo uma discrepância muito pequena entre os requisitos de extração. Por este mesmo motivo é que o tempo para atingir os critérios de extração prévio para esta configuração foi de 30s. Desta forma a temperatura está praticamente equivalente à de extração, pelo que é possível efetuar uma comparação das restantes relativamente a este que é o melhor caso de estudo.

O motivo pelo qual se optou por esta solução deve-se a esta permitir uma análise equitativa perante todos os caso de estudo, uma vez que as condições de processamento são as mesmas e desta forma é propriamente avaliado o desempenho na remoção de calor da peça e do molde, pois independentemente da peça estar completamente solidificada ou não, se a uniformidade térmica for atingida o mais rapidamente possível entre a cavidade e a bucha, é equivalente a um arrefecimento balanceado do ponto de vista térmico.

Outra possibilidade era analisar a temperatura no final de cada ciclo, ou seja, comparar o gradiente térmico no momento em que a peça apresenta os requisitos para extração. No entanto, não se optou por esta abordagem uma vez que não permite uma comparação tão perceptível como a escolhida, pois a análise não é feita em condições de igualdade porque os tempos de arrefecimento têm uma diferença demasiado desproporcional.

No decorrer deste tópico, será feita uma análise particular de cada caso de estudo, de forma a que se especifiquem as características térmicas distintas de cada um e no final uma análise geral para comparar as características mais evidentes.

6.1.2.1. Sistema de canais convencionais

Neste primeiro caso de estudo, e como já seria de esperar, o gradiente térmico é muito considerável no sentido em que são muito visíveis os diferentes valores de temperatura devido ao seu perceptível contraste. Isto deve-se à peça requerer aproximadamente 127s para atingir a temperatura desejada, ou seja, no tempo em análise, estamos perante um estado em que o polímero injetado transmitiu calor ao molde e ainda pouco dele foi extraído pelo sistema de arrefecimento.

A temperatura mais elevada da peça é atingida na região próxima da superfície da bucha que tem contacto com a base da peça, sendo cerca de 188,2°C. Por outro lado, no molde, a temperatura máxima é atingida na parte superior da bucha (189°C) e em contraste, no interior da base da bucha na região da linha de partição é atingida uma temperatura de 121°C.

Conforme já foi referido, é possível analisar uma distribuição da temperatura na bucha, (**Figura 50**), sendo a análise onde é mais perceptível a ausência do arrefecimento da bucha e a dificuldade no arrefecimento, que é apenas eficaz nas regiões da sua proximidade, ou seja, na região mais próxima do canal de arrefecimento.

Na cavidade por outro lado, a variação de temperatura não é tão definida e tão elevada como na bucha devido ao maior volume e o contacto com a superfície exterior do molde que lhe permite uma melhor dissipação de calor. As temperaturas desta região pertencem a uma gama entre os 110-120°C, e na região do sistema de alimentação de canais quentes, este aumento é mais significativo na região do ataque.

Outro ponto que é importante referir vai de encontro à região do molde mais quente ser no topo da bucha, ou seja, na região em contacto com a espessura mais elevada da peça. Esta região de maior concentração de calor tem um gradiente de temperatura de 70°C entre a bucha e a cavidade. Pelo contrário, na região junto à orla da peça, esta diferença é de apenas 10°C.

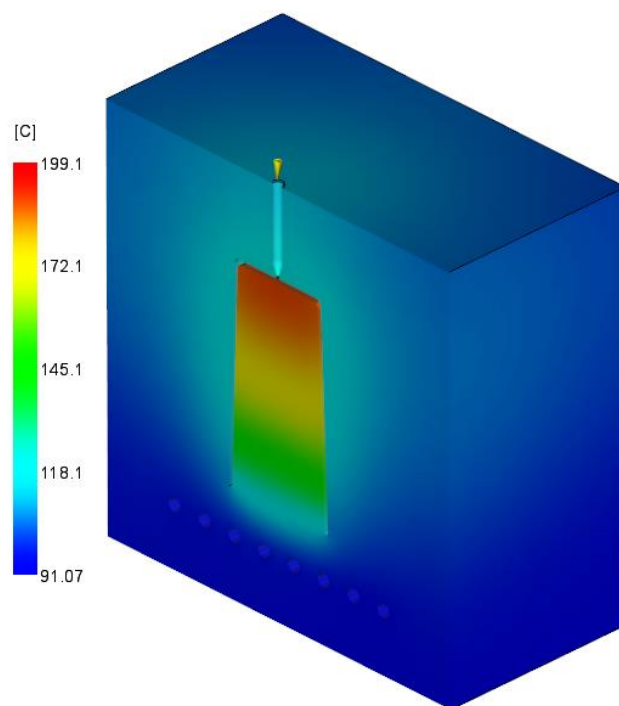


Figura 50 –Temperaturas do molde (em corte) do caso de estudo 5.1

6.1.2.2. Sistema de canais com lâminas separadoras

No segundo caso do estudo, a temperatura máxima da peça é de aproximadamente 133,8°C, e localizada na espessura da sua base sob o ataque.

Relativamente à temperatura do molde (ver **Figura 51**), e contrariamente ao último caso de estudo, a temperatura na bucha é inferior à da cavidade. Isto ocorre devido ao arrefecimento do interior da bucha pelas lâminas separadoras

A diferença de temperatura máxima na bucha, atinge os 12°C. A região com maior temperatura localiza-se na extremidade arredondada da bucha, que já por si é uma zona de elevada concentração de calor que ainda é incrementada pela distância às lâminas separadoras. Uma região onde também é nítido um aumento de temperatura face à envolvente é no ataque.

É perceptível também o aumento de temperatura nos canais de arrefecimento, que se deve ao facto das 4 lâminas separadoras estarem dispostas numa configuração em série. A região de menor temperatura (lado direito da imagem) é a entrada da água e a de maior temperatura (lado esquerdo da imagem) é a sua saída, estando o molde próximo a uma temperatura de 92,67°C e 96,10°C (ver **Figura 52**), respetivamente. No entanto, a temperatura da água ao longo do percurso ultrapassa menos de meio grau os valores recomendados (ver **Figura 53**) [14].

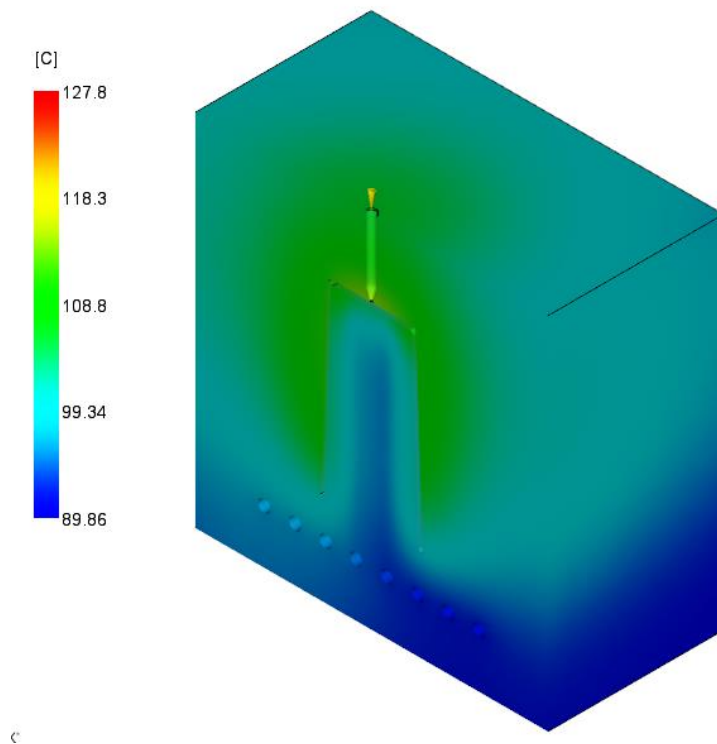


Figura 51 - Temperaturas do molde (em corte) do caso de estudo 5.2

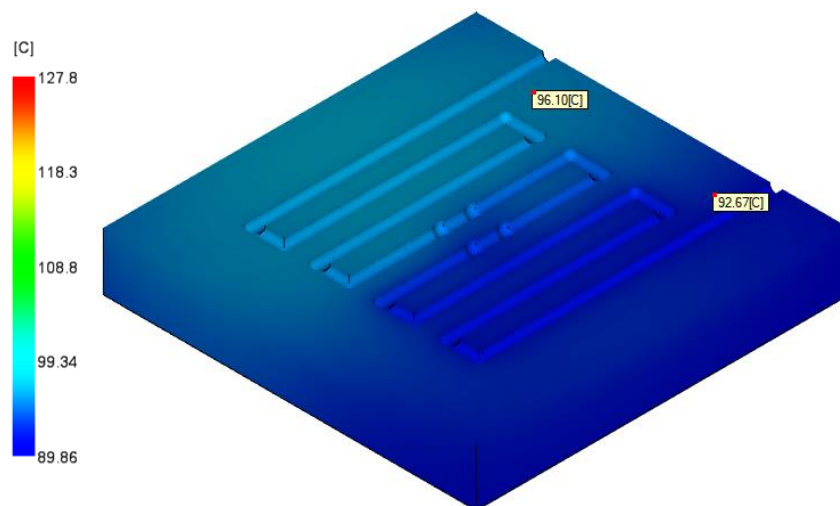


Figura 52 - Temperaturas na placa da bucha do molde (em corte) do caso de estudo 5.2

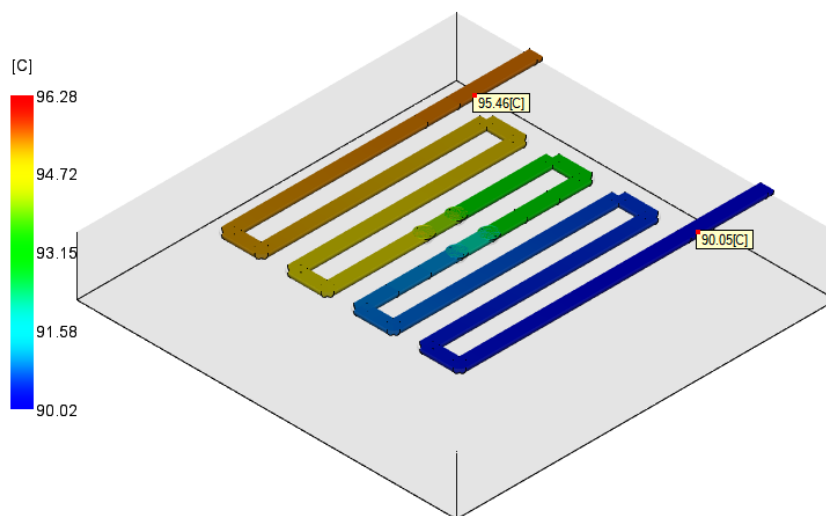


Figura 53 - Temperaturas no sistema de canais do caso de estudo 5.2

6.1.2.3. Sistema de canais com o núcleo de refrigeração/sistemas borbulhantes

No terceiro caso do estudo, a temperatura máxima da peça é atingida na espessura da base da peça sob o ataque e é aproximadamente 130°C.

À semelhança com o caso anterior, a temperatura no interior da bucha é inferior à da cavidade, no entanto, essa diferença é agora ainda mais visível, conforme se pode ser na **Figura 54**. Para além disso, a bucha apresenta uma melhor distribuição térmica, sem variações tão significativas como o anterior. Este ponto está relacionado com a região que o sistema borbulhante atinge ser maior (devido ao diâmetro maior do sistema borbulhante), permitindo uma temperatura mais uniforme na bucha. A variação de temperatura na interface metal/água em nada se equipara aos anteriores, pois a região do molde iminente ao canal de entrada de água varia 1°C em relação à região iminente ao canal de saída. Quanto à variação da temperatura da água, é inferior a 1°C.

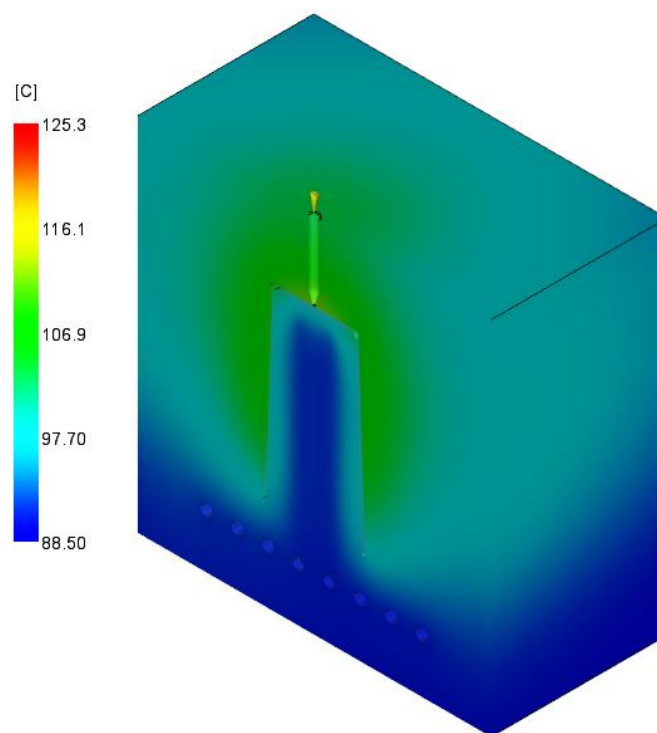


Figura 54 - Temperaturas do molde (em corte) do caso de estudo 5.3

6.1.2.4. Inserto com alta condutividade térmica (AMPCO 940®)

6.1.2.4.1. Inserto com linha de água interior

Este caso de estudo é o primeiro no qual o material da bucha é substituído por um material de alta condutividade térmica, significando que a elevada condução permitiu uma variação de temperaturas muito mais reduzida no interior da bucha que o material normalmente utilizado.

Conforme já foi mencionado no início desta comparação de temperaturas, a temperatura máxima da peça é atingida na espessura da base da peça sob o ataque e é aproximadamente 126°C.

Relativamente ao molde, conforme se pode ver na **Figura 55**, a temperatura do inserto é praticamente constante (tanto no plano da linha de água como no que lhe é perpendicular) com uma pequena variação (1°C) na extremidade arredondada. Esta temperatura é igual à da placa da bucha.

Ainda que esta uniformidade se verifique na bucha, na cavidade continua a ser visível a temperatura elevada que envolve a cavidade, no entanto, esta região aparenta uma ligeira diminuição face às anteriores, resultado da extração de calor graças à alta condutividade da base do inserto que se propaga ligeiramente até à cavidade.

Novamente, na região do molde próxima do ataque existe um aumento da temperatura.

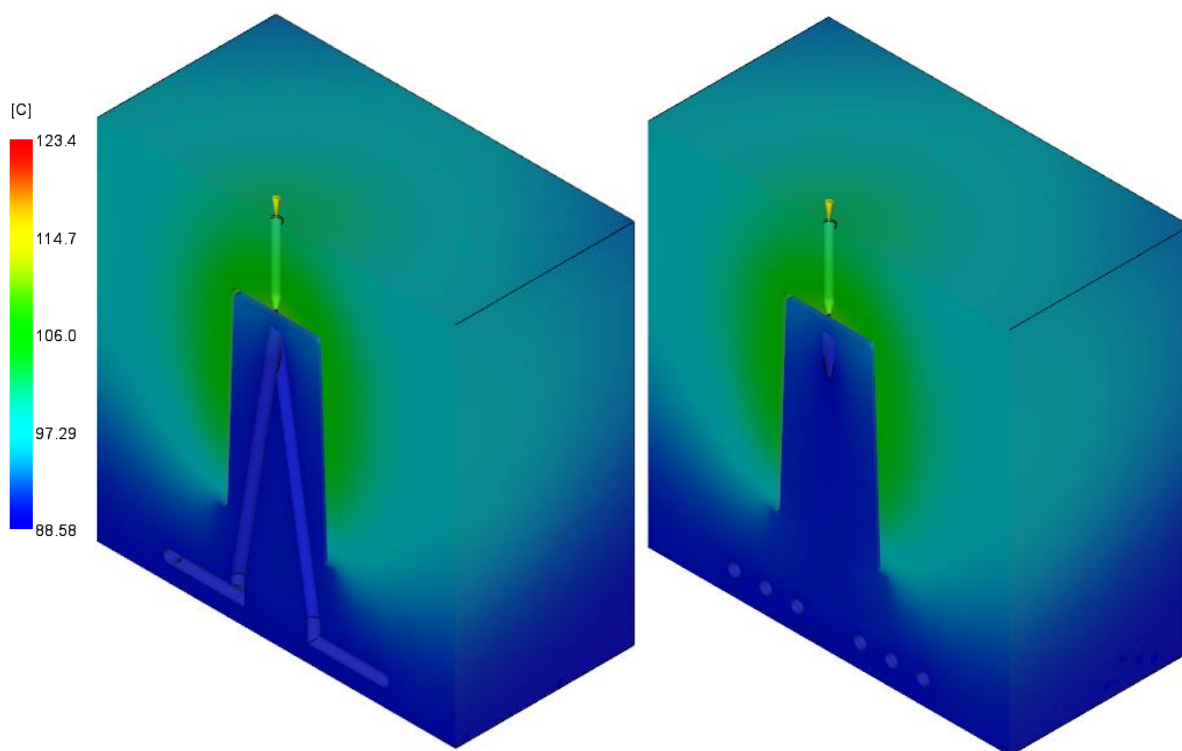


Figura 55 - Temperaturas do molde segundo os dois planos (em corte) do caso de estudo 5.4.1

6.1.2.4.2. Sistema de canais convencionais com inserto

Neste caso de estudo o resultado foi bastante diferente do anterior, como já seria de esperar, pois ainda que o inserto seja de elevada condutividade térmica, está ausente a componente de transferência de calor por convecção no interior da bucha. Assim, apenas se está a transmitir o calor fornecido pelo polímero mais rapidamente do inserto até ao meio arrefecedor.

A temperatura máxima da peça é atingida no meio da espessura da base da peça sob o ataque e é aproximadamente 149,5°C.

Este incremento na condutividade é bastante evidente (**Figura 56**), pois o inserto tem uma temperatura mais baixa e com um menor gradiente da temperatura em comparação com a bucha do caso de estudo 5.1, ainda com uma maior distância dos canais à peça.

Por outro lado, ainda que a bucha registe temperaturas mais elevadas, a cavidade tem uma temperatura considerável, sendo a região próxima do ataque novamente mais quente que a envolvente.

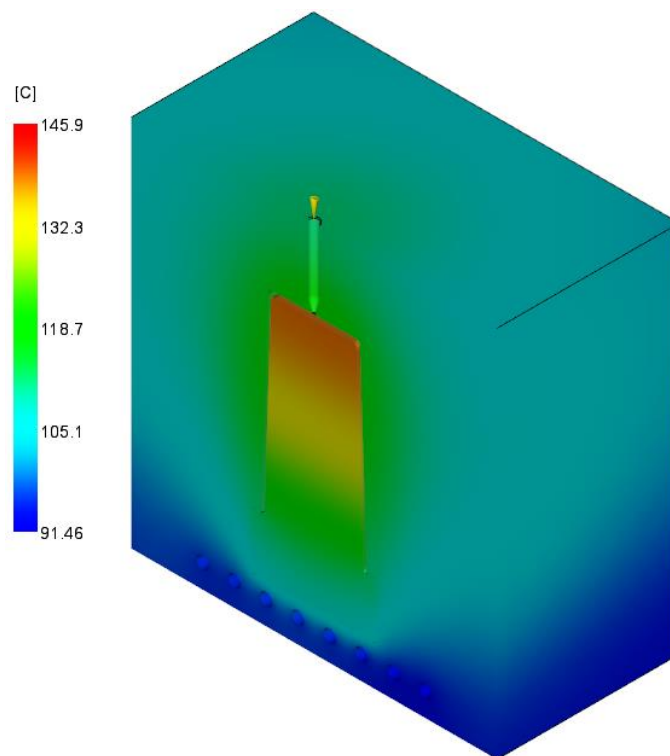


Figura 56 - Temperaturas no molde (em corte) do caso de estudo 5.4.2

6.1.2.5. Sistema de canais conformais

Neste caso de estudo a temperatura máxima da peça é atingida na espessura da base da peça próxima do ataque e é aproximadamente 130,5°C.

A temperatura da bucha é uniforme, com exceção da região superior da mesma (ver **Figura 57**). Esta uniformidade é influenciada pela proximidade ao sistema de canais conformais, ainda que a temperatura da bucha entre os canais e a parede da peça aumente ligeiramente com o aumento da distância aos mesmos. Por outro lado, a não uniformidade de temperatura da região superior da bucha é devida por um lado ao afastamento do canal da extremidade arredondada (visível no lado esquerdo da mesma) e por outro, à sua ausência de um dos lados (visível no lado direito da mesma). Os dois planos de corte da **Figura 57** permitem avaliar esta última questão com base num plano paralelo e perpendicular à linha de água da placa da bucha. Nesta avaliação é possível verificar ainda, que a cavidade tem novamente uma concentração de calor, à semelhança de todos os anteriores, com um ligeiro aumento na região do ataque

Por outro lado, este caso de estudo é o que tem canais na placa da bucha menos abrangentes (em área) pois apenas tem uma ligação direta à entrada e saída do fluído, o que resulta num arrefecimento da placa da bucha inferior aos restantes, que têm aí uma configuração em canais convencionais. Ainda relativamente à linha de água, a orientação do

fluido que permitiu obter os melhores resultados foi a indicada na **Figura 48**, em comparação com o sentido inverso ao representado pelas setas da mesma figura.

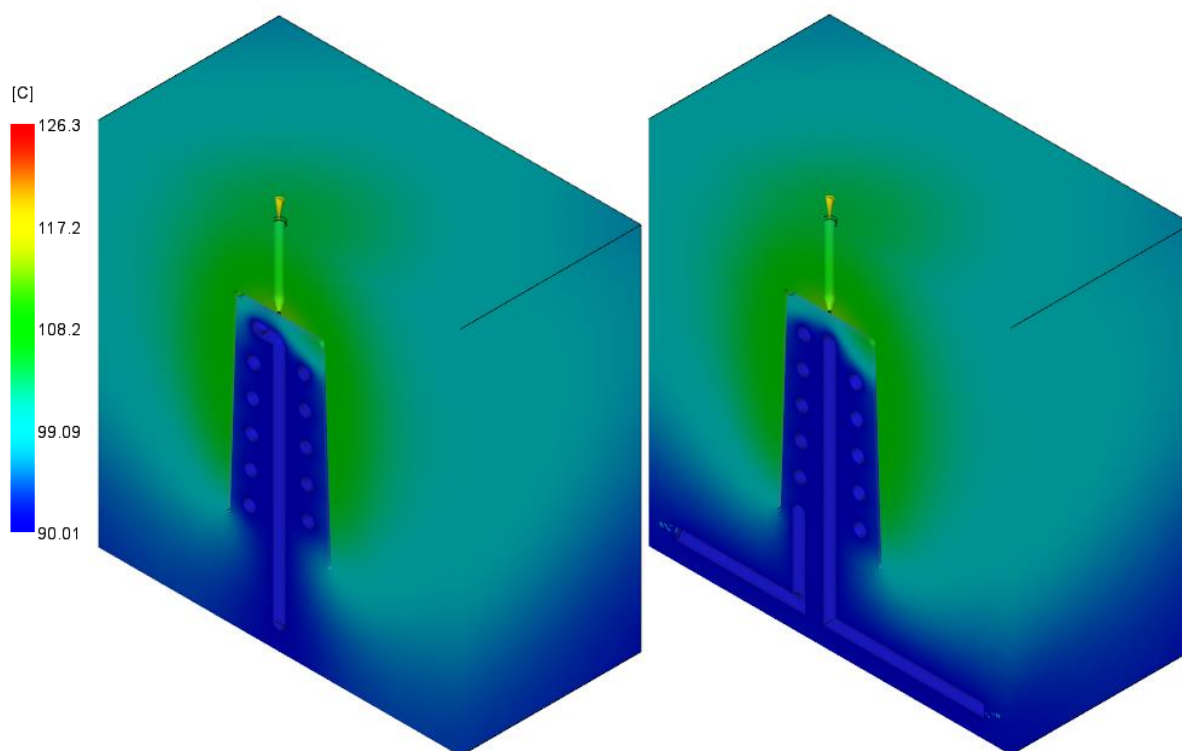


Figura 57 - Temperaturas no molde segundo os dois planos (em corte) do caso de estudo 5.5

6.1.2.6. Avaliação global

Após terem sido apresentados cada caso de estudo em particular e as especificidades de cada um relativamente à distribuição de temperatura, é feita uma série de apreciações do ponto de vista global, ou seja, fazendo referência às características que se verificaram no geral das configurações, comparando todos os casos de estudo.

Nas avaliações que se precederam relativamente à peça, apenas foi mencionada a temperatura máxima, no entanto, de forma a facilitar a avaliação das restantes temperaturas nas várias estratégias de arrefecimento, optou-se pela utilização de gráficos que exibem a evolução desta ao longo da espessura da peça, ao invés de uma descrição semelhante à realizada para o molde. Gráficos que embora não tenham o mesmo grau de rigor a uma descrição detalhada, permitem uma melhor comparação entre os sistemas escolhidos.

Assim sendo, seleccionou-se um ponto na superfície da base e outro na superfície lateral da peça (conforme a **Figura 58**), de cada uma das estratégias de arrefecimento, de forma a avaliar a temperatura em dois pontos afastados e sujeitos a diferentes temperaturas de molde, tal como as 2 espessuras presentes na peça (2 e 3 mm).

Os gráficos resultantes do ponto na base e na lateral estão representados respetivamente na **Figura 59** e na **Figura 60** e a linha de cor preta marca a temperatura de extração (correspondente a 125°C) de forma a uma análise comparativa simplificada. Esta linha apenas foi apresentada no gráfico correspondente ao ponto da base uma vez que no ponto da lateral da peça, nenhuma configuração de arrefecimento atinge valores próximo dela no instante em questão.

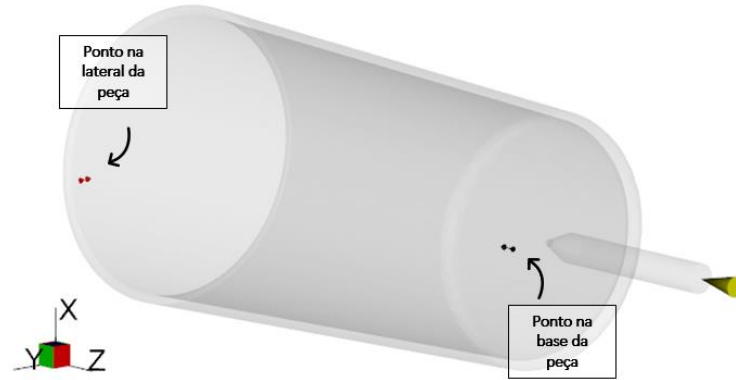


Figura 58 - Pontos selecionados para a análise da temperatura ao longo da espessura

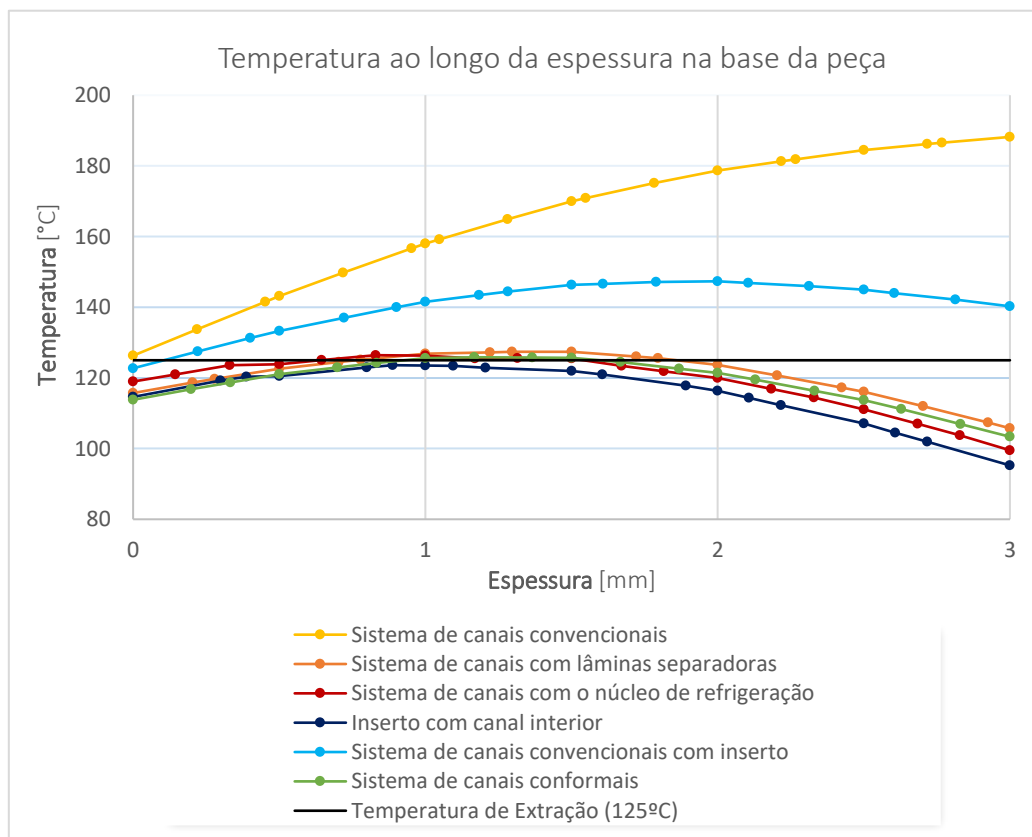


Figura 59 - Gráfico da temperatura ao longo da espessura na base da peça nas diferentes tipologias de arrefecimento

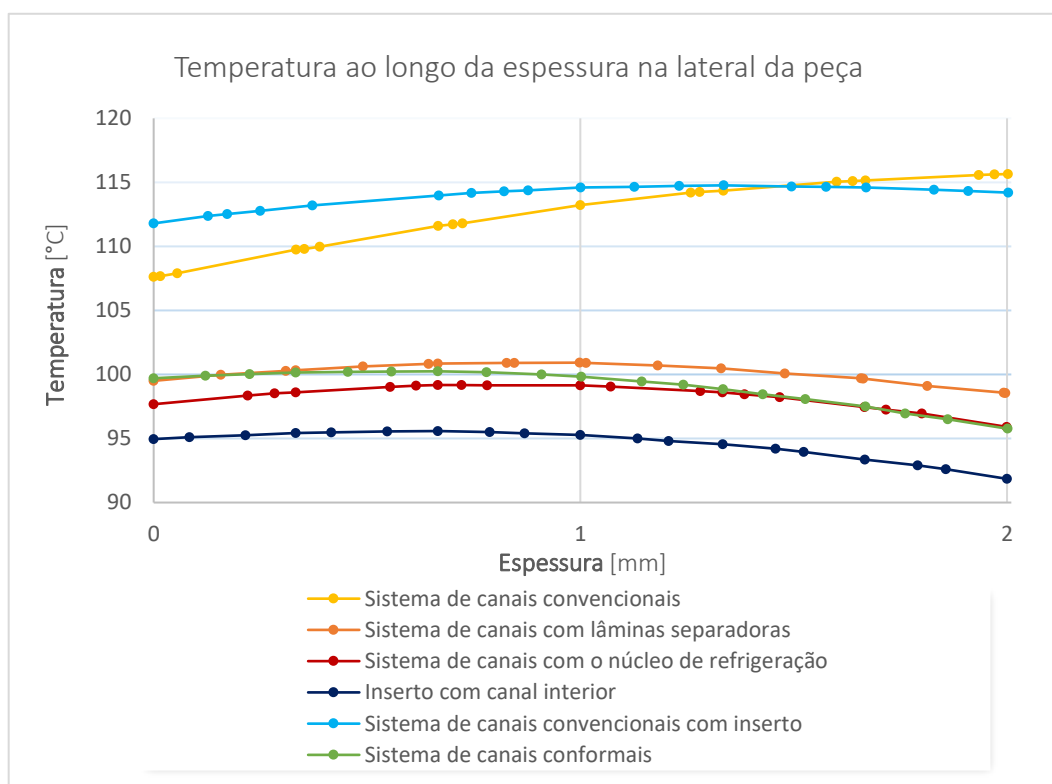


Figura 60 - Gráfico da temperatura ao longo da espessura na lateral da peça nas diferentes tipologias de arrefecimento

É de referir que os resultados obtidos são referentes ao tempo de 28,63s e aos pontos apresentados na **Figura 58**.

Através dos gráficos obtidos, na **Figura 59** e **Figura 60**, é possível concluir que a maior temperatura atingida ao longo da espessura dos pontos seleccionados ocorre antes ou no meio da espessura (ou seja, mais próxima da superfície da peça em contacto com a cavidade), exceto as tipologias de arrefecimento que fazem uso de canais convencionais. Nos casos de estudo com sistemas de canais convencionais, a temperatura é crescente em ambos os gráficos, pelo que a temperatura da peça do lado da bucha é mais elevada que a temperatura da peça do lado da cavidade (pontos extremos direito e esquerdo do gráfico, respetivamente). Por outro lado, no sistema de canais convencionais com inserto a temperatura máxima é atingida (em ambos os pontos) após metade da espessura em questão, ou seja, na superfície da peça mais próxima da bucha. Todos estes resultados vão de encontro ao gradiente térmico do molde, pois no caso de estudo do sistema de canais convencionais é a bucha que tem a temperatura máxima; no sistema de canais convencionais com inserto, a bucha está a uma temperatura mais elevada que a cavidade, mas inferior à do polímero em contacto. Nos restantes casos de estudo, a cavidade está a uma temperatura superior à da bucha, pelo que a temperatura máxima na peça é atingida no interior da espessura mais próxima da cavidade, que por sua vez tem uma temperatura que não diferencia assim tanto da máxima atingida na peça, como pode ser visto nos gráficos.

Assim, fica claro que com a exceção do sistema de canais convencionais e do sistema de canais convencionais com inserto, a temperatura da cavidade é mais elevada que a da bucha pela ausência de elementos de arrefecimento neste primeiro.

A temperatura da cavidade é elevada, e este é o principal fator pelo qual a uniformidade térmica entre a bucha e cavidade não é atingida, pois nos casos de estudo em que a temperatura é uniforme ao longo da bucha, a temperatura da cavidade próxima da peça é mais elevada que a temperatura da bucha próxima da peça.

Por causa deste aspeto é que o sistema de canais com lâminas separadoras tem a menor diferença de temperatura (entre a máxima e a mínima) em ambos os pontos, porque a temperatura da cavidade próxima da peça é elevada, mas a temperatura da bucha próxima da peça também é (devido distância entre a superfície da bucha e as lâminas separadoras).

É de salientar que o aumento da temperatura na região do molde próxima do ataque quente é um resultado transversal a todos os casos de estudo.

6.2. Deflexão

A análise da deflexão foi realizada através da mensuração das cotas críticas, anteriormente referidas, em cada análise executada e referente a cada configuração de arrefecimento.

A deflexão da peça pode ser analisada de duas formas, de uma forma global ou discretizada. Isto é, pode analisar-se a deflexão total ou cada uma das diferentes componentes que a constituem. Estas diferentes componentes que contribuem para a deflexão total são o arrefecimento diferencial, a contração diferencial e a orientação. Assim a deflexão foi analisada segundo cada um destes efeitos (contração diferencial, arrefecimento diferencial e orientação) e em cada uma das componentes associadas (X, Y e Z).

Neste sentido, cada cota crítica tem associados dois nós e a variação da distância entre estes face à inicial permitiu criar a **Tabela 21**.

Tabela 21 – Valores das quotas críticas e respetiva variação (por deflexão) nas diferentes arquiteturas de arrefecimento

			Sistema de canais convencionais	Sistema de canais com lâminas separadoras	Sistema de canais com o núcleo de refrigeração	Inserto com canal interior	Sistema de canais convencionais com inserto	Sistema de canais conformais
Diâmetro ZY 66,36 ±0,14	Arrefecimento Diferencial	Componente X	66,35 (0,01)	66,36 (0,00)	66,36 (0,00)	66,38 (0,02)	66,36 (0,00)	66,36 (0,00)
		Componente Y	66,35 (0,01)	66,36 (0,00)	66,36 (0,00)	66,38 (0,02)	66,36 (0,00)	66,36 (0,00)
		Componente Z	66,35 (0,01)	66,36 (0,00)	66,36 (0,00)	66,38 (0,02)	66,36 (0,00)	66,36 (0,00)
	Contração Diferencial	Componente X	65,87 (0,49)	65,87 (0,49)	65,87 (0,49)	65,92 (0,44)	65,86 (0,50)	65,84 (0,52)
		Componente Y	65,87 (0,49)	65,87 (0,49)	65,87 (0,49)	65,92 (0,44)	65,86 (0,50)	65,84 (0,52)
		Componente Z	65,87 (0,49)	65,87 (0,49)	65,87 (0,49)	65,92 (0,44)	65,86 (0,50)	65,84 (0,52)
Diâmetro ZX 66,36 ±0,14	Arrefecimento Diferencial	Componente X	66,36 (0,00)	66,37 (0,01)	66,37 (0,01)	66,37 (0,01)	66,36 (0,00)	66,38 (0,02)
		Componente Y	66,36 (0,00)	66,37 (0,01)	66,37 (0,01)	66,37 (0,01)	66,36 (0,00)	66,38 (0,02)
		Componente Z	66,36 (0,00)	66,37 (0,01)	66,37 (0,01)	66,37 (0,01)	66,36 (0,00)	66,38 (0,02)
	Contração Diferencial	Componente X	65,87 (0,49)	65,87 (0,49)	65,87 (0,49)	65,85 (0,51)	65,86 (0,50)	65,84 (0,52)
		Componente Y	65,87 (0,49)	65,87 (0,49)	65,87 (0,49)	65,85 (0,51)	65,86 (0,50)	65,84 (0,52)
		Componente Z	65,87 (0,49)	65,87 (0,49)	65,87 (0,49)	65,85 (0,51)	65,86 (0,50)	65,84 (0,52)
Altura 125,000 ± 0,203	Arrefecimento Diferencial	Componente X	125,00 (0,00)	125,00 (0,00)	125,00 (0,00)	125,00 (0,00)	125,00 (0,00)	125,00 (0,00)
		Componente Y	125,00 (0,00)	125,00 (0,00)	125,00 (0,00)	125,00 (0,00)	125,00 (0,00)	125,00 (0,00)
		Componente Z	125,00 (0,00)	125,00 (0,00)	125,00 (0,00)	125,00 (0,00)	125,00 (0,00)	125,00 (0,00)
	Contração Diferencial	Componente X	124,22 (0,78)	124,24 (0,76)	124,25 (0,75)	124,22 (0,78)	124,21 (0,79)	124,10 (0,90)
		Componente Y	124,22 (0,78)	124,24 (0,76)	124,25 (0,75)	124,22 (0,78)	124,21 (0,79)	124,10 (0,90)
		Componente Z	124,22 (0,78)	124,24 (0,76)	124,25 (0,75)	124,22 (0,78)	124,21 (0,79)	124,10 (0,90)

Após analisar os resultados obtidos, chegou-se à conclusão de que a deflexão por efeitos da orientação foi nula em toda a peça, pois o valor da contração é igual para direções paralelas e perpendiculares à direção da orientação do material. Assim, a deflexão desenvolvida é devida aos efeitos do arrefecimento diferencial e da contração diferencial, pelo que apenas estes dois foram referidos na **Tabela 21**.

Conforme é possível concluir da mesma tabela, está-se perante medições segundo diferentes coordenadas e os valores medidos (diâmetros e altura) são diferentes, resultando em três valores de deflexão segundo cada efeito para cada sistema de arrefecimento. Se em alguns casos, para uma mesma medida, o valor da deflexão é igual segundo os dois planos diferentes (neste caso ZY e ZX), noutros casos isso não acontece. Assim de forma a possibilitar uma comparação entre as diferentes abordagens de arrefecimento, estabeleceu-se um efeito global, resultante da soma do valor de deflexão mais elevado segundo o efeito de contração diferencial e segundo arrefecimento diferencial. Este efeito global está explícito na **Tabela 22** bem como no gráfico da **Figura 61**.

Tabela 22 - Tabela resumo das deflexões (em módulo) de cada geometria relativas ao efeito da contração diferencial e arrefecimento diferencial

		Contração diferencial máxima [mm]	Ø ZY	Arrefecimento diferencial máximo [mm]	Ø ZY	Total [mm]
			Ø ZX		Ø ZX	
			Altura		Altura	
1º	Sistema de canais com o núcleo de refrigeração	0,75	0,49	0,01	0,00	0,76
			0,49		0,01	
			0,75		0,00	
2º	Sistema de canais com lâminas separadoras	0,76	0,49	0,01	0,00	0,77
			0,49		0,01	
			0,76		0,00	
3º	Sistema de canais convencionais com inserto	0,79	0,50	0,00	0,00	0,79
			0,50		0,00	
			0,79		0,00	
4º	Sistema de canais convencionais	0,78	0,49	0,01	0,01	0,79
			0,49		0,00	
			0,78		0,00	
5º	Inserto com canal interior	0,78	0,44	0,02	0,02	0,80
			0,51		0,01	
			0,78		0,00	
6º	Sistema de canais conformais	0,90	0,52	0,02	0,00	0,92
			0,52		0,02	
			0,90		0,00	

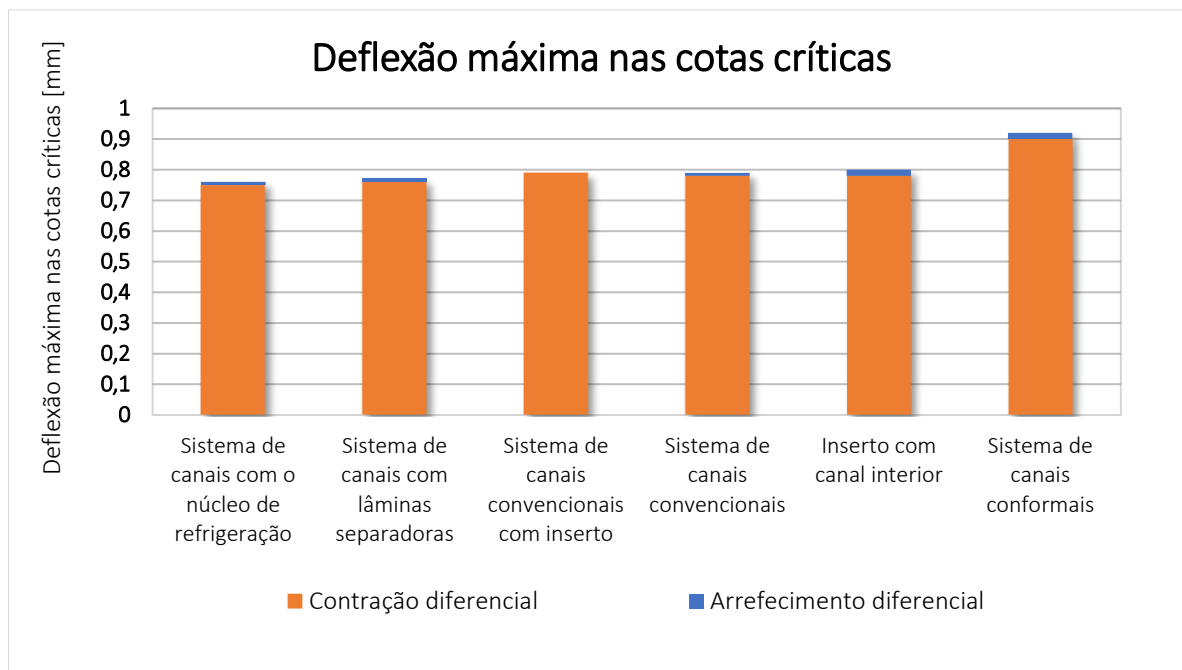


Figura 61 – Gráfico das deflexões máximas (em módulo) segundo cada geometria relativas ao efeito da contração diferencial e arrefecimento diferencial

Os resultados obtidos na deflexão pelo efeito da contração diferencial correspondem em todos os casos à deflexão da altura da peça, já pelo efeito do arrefecimento diferencial correspondem à deflexão dos diâmetros, uma vez que a deflexão da altura por este efeito é nula.

Numa primeira análise dos resultados, rapidamente se percebe que o grande contributo para a deflexão na peça independentemente da configuração utilizada é a contração diferencial. Valor esse que, ainda que varie mais significativamente com a utilização do sistema de canais conformais, é no geral muito semelhante, algo que já seria de esperar devido à contração volumétrica. Esta última advém de aspetos como a geometria e variações de espessura, o que se traduz em regiões com diferentes tempos de arrefecimento. Assim, com base nestes fatores a região da base do copo está sujeita a uma contração volumétrica maior, devido ao desnível entre a espessura de 2 e 3mm e ao ataque quente que aí se localiza.

O sistema de canais com o núcleo de refrigeração é aquele que dá origem a uma deflexão pelo efeito da contração diferencial na peça menor, ainda que só exista uma diferença de 0,3mm face ao inserto com canal interior, que é o resultado mais elevado com exclusão do valor máximo, atingido pelo sistema de canais conformais.

Relativamente à deflexão por efeito do arrefecimento diferencial, esta é devida, conforme o próprio nome indica, a um arrefecimento desigual no molde e nas suas superfícies. Ocorre frequentemente do lado exterior e interior de arestas salientes do molde, próximo dos ataques e em variações de espessura. No entanto, nestes casos em específico, o impacto na deflexão causada por este efeito é muito reduzido comparativamente ao da contração diferencial, o que demonstra que apesar de já terem

sido observados os impactos das diferentes geometrias nas temperaturas do molde e da peça, estes não são aqui replicados.

Assim, segundo estes resultados, o sistema de canais convencionais com inserto é o caso de estudo cuja deflexão por arrefecimento diferencial é nulo. Em contraste com o sistema de canais conformais e o inserto com canal interior que obtiveram o valor mais elevado

Relembra-se que o tempo de residência da peça no molde é bastante diferente de geometria para geometria, e evidentemente que se for feita uma análise no tempo em que a peça atinge os critérios de extração, a distribuição de temperaturas será bastante diferente, comparativamente. Ou seja, os sistemas de arrefecimento que têm piores resultados na deflexão (efeito global), são aqueles cujo tempo até atingir os requisitos de extração é inferior. Os sistemas com um arrefecimento mais lento (que o sistema de canais conformais e o inserto com canal interior) foram aqueles cuja deflexão na **Tabela 22** foi menor. Estes demonstram uma evolução de temperatura no sentido de uma temperatura uniforme na bucha e na cavidade, atingida no tempo em que a peça está em condições de ser extraída.

Foi induzido com o sistema de canais com lâminas separadoras um valor superior de deflexão por arrefecimento diferencial na peça relativamente ao sistema de canais com o núcleo de refrigeração devido ao aumento de temperatura do fluído ao longo do canal, o que provocou uma extração de calor diferente na secção do canal final comparativamente à inicial.

Por outro lado, foi induzido pelo sistema de canais convencionais com inserto um resultado semelhante ao do sistema de canais convencionais, ainda que o primeiro tenha originado um valor de deflexão por efeito do arrefecimento diferencial na peça nulo, conforme já foi referido, devido à elevada condutividade do inserto que promove uma distribuição mais uniforme da temperatura comparativamente ao material do molde normalmente utilizado, como é o caso do sistema de canais convencionais.

Um raciocínio análogo permite assim também compreender, para além do fator temporal já mencionado, a razão pela qual foi obtido pelo inserto com canal interior um resultado melhor que o sistema de canais conformais nesta questão da deflexão.

Embora os resultados da deflexão tenham relevo e devam ser tidos em consideração, dada a proximidade entre os valores obtidos e ao facto da deflexão, com base no método escolhido para este caso, se dever em média 98,6% à contração diferencial, enquanto a deflexão causada pelo arrefecimento diferencial é praticamente desprezável, a tomada de decisão da geometria de arrefecimento com base neste indicador tende a ter um peso menos considerável que os anteriores.

Para além disso, o resultado mais elevado da deflexão por contração diferencial, ou seja, no caso do sistema de canais conformais, corresponde a 0,72% da dimensão respetiva, que apesar de ultrapassar significativamente o valor definido pelo toleranciamento, é um valor reduzido.

Ora, com base no já mencionado, a peça deve ser alterada em termos geométricos, especificamente, na uniformização das espessuras, para colmatar a elevada deflexão pelo efeito da contração diferencial induzida na peça. Desta forma, obter-se-iam resultados mais elevados e díspares na deflexão da peça por efeito do arrefecimento diferencial pelos diversos sistemas de arrefecimento estudados. Por consequência, era possível deduzirem-

se considerações mais concretas que as desenvolvidas face ao objetivo deste trabalho, que se prende com a influência do sistema de arrefecimento no toleranciamento da peça e não na peça em si.

(Esta página foi intencionalmente deixada em branco)

7. Caso de estudo otimizado

Após a análise do conjunto de resultados obtidos com todos os casos de estudo realizados, constataram-se uma série de conclusões que ainda que já possam ter sido abordadas serão mais desenvolvidas de seguida.

Nas geometrias em que a tipologia de arrefecimento contempla a bucha, é atingida homogeneidade térmica no seu interior, tendo os melhores resultados sido conseguidos com auxílio do inserto com canal interior, bem como recorrendo aos sistemas de canais conformais e de canais com núcleo de refrigeração/sistemas borbulhantes. Por sua vez, a temperatura da cavidade é muito elevada em todos os casos de estudo, com um aumento na região próxima do ataque. Assim, reduzir a temperatura da cavidade é o primeiro passo para, por um lado melhorar a uniformidade térmica entre a cavidade e a bucha, e por outro diminuir o tempo de arrefecimento da peça.

Assim, é primordial otimizar o circuito de refrigeração da bucha e conferir um à cavidade, garantindo um arrefecimento desta última e um arrefecimento mais equilibrado da bucha, tendo em consideração as regiões identificadas como problemáticas (extremidade arredonda na bucha e região do ataque na cavidade).

Note-se que o principal objetivo aquando da introdução deste sistema de canais conformais otimizados se prende com a melhoria do tempo para atingir as condições de extração e com a melhoria da uniformidade térmica, posto que o empeno relativo ao arrefecimento diferencial tem um valor insignificante e a melhoria prevista com esta nova implementação relativamente à deflexão por contração diferencial, é nula ou praticamente irrelevante.

Os resultados relativos ao empeno mostraram que o maior contributo para a deflexão nas quotas críticas foi a contração diferencial, não variando consideravelmente nas diferentes configurações estudadas. Isto prova que a peça selecionada para este estudo não é a mais adequada devido à sua simplicidade, elevada razão de aspeto e a alguns aspetos geométricos, ou seja, uma peça com maior complexidade revelaria uma maior discrepância de valores obtidos pelas diversas estruturas de arrefecimento.

Não obstante de tudo o referido até agora na questão da deflexão, e muito embora a solução para o cumprimento do toleranciamento seja a já referida modificação da peça, numa tentativa de estudar melhor as influências no resultado obtido sem proceder a essa modificação foi realizada uma análise paramétrica. Análise em que se fez variar as condições de processamento para avaliar a sua influência na deflexão das cotas críticas [18].

O incremento da temperatura no molde é uma opção excluída uma vez que o seu impacto já foi indiretamente estudado nos casos de estudo com um inserto de alta condutividade (que possuem uma elevada difusividade térmica). Ou seja, se num inserto de alta condutividade a deflexão nas cotas críticas aumenta, ao elevar a temperatura do molde, este valor será também superior, pelo que não é uma solução para o problema. Para além disso, o aumento da temperatura do molde, resultaria num aumento do tempo necessário para atingir os critérios de extração. A variação do tempo de injeção, ou do perfil de compactação não se verificaram benéficos provocando até um aumento de deflexões. Assim, de entre as medidas de otimização selecionadas para esta análise, além da alteração do sistema de canais conformais optou-se também por variar o diâmetro do ataque.

7.1. Modelação e simulação

Com base em todas as constatações descritas anteriormente, foi criado um último caso de estudo. Uma vez que surge com o intuito de resolver esta série de problemas, ou seja, para o otimizar, será denominado daqui para a frente como caso de estudo otimizado.

Este caso de estudo otimizado é baseado num sistema de canais conformais uma vez que é perceptível que não se beneficiou totalmente do seu potencial no caso previamente estudado.

De forma a criar um sistema de canais conformais otimizados, foi necessário reanalisar as regras de projeto previamente utilizadas, no entanto, a tipologia do sistema de canais conformais foi mantida com um perfil em espiral. Pela análise da **Figura 46** resultante da referência [85], a redução do diâmetro do canal para um diâmetro inferior permitiria um maior número de linhas que abrangeriam uma área superficial maior, decorrente de uma menor distância entre os canais e entre os canais e a cavidade.

Neste sentido, para além de ter sido selecionado um canal de 6mm (diâmetro típico inferior mais próximo [14]) na gama de valores disponível, foi selecionado o valor mínimo dos coeficientes das distâncias, de forma a reduzi-las.

Através das relações selecionadas, obtiveram-se os valores explicitados na **Tabela 23**.

Tabela 23 - Parâmetros do sistema de canais conformais otimizados

	Relação	Dimensão [mm]
diâmetro do canal b	-	6
distância entre o centro dos canais a	2 b	12
Distância entre o centro dos canais e a cavidade c	1,5 b	9

O sistema de canais conformais otimizados agora completamente definido foi modelado num *software* CAD, e a sua representação na **Figura 62** (o desenho na sua integra pode ser consultado no **ANEXO I**). Note-se que a representação é feita com a peça, pois a modelação também foi realizada com esta para garantir e facilitar o posicionamento e alinhamento exato do sistema de canais conformais otimizados relativamente à peça.

Todos os parâmetros foram cumpridos na modelação dos canais, garantindo também uma secção constante ao longo deste. Salienta-se que para além do sistema de canais conformais para a bucha, foi igualmente modelado um sistema de canais conformais para a cavidade. Nesta modelação, houve um cuidado especial, de forma a tentar abranger completamente a peça da melhor forma (tanto na cavidade como na bucha), respeitando

os parâmetros definidos. O sistema de canais conformais da cavidade também foi modelado de forma a incluir a região do molde próxima do ataque quente devido à problemática causada por esta anteriormente. Ainda relativamente aos canais, estes apenas foram afastados da peça para as respetivas saídas e entradas.

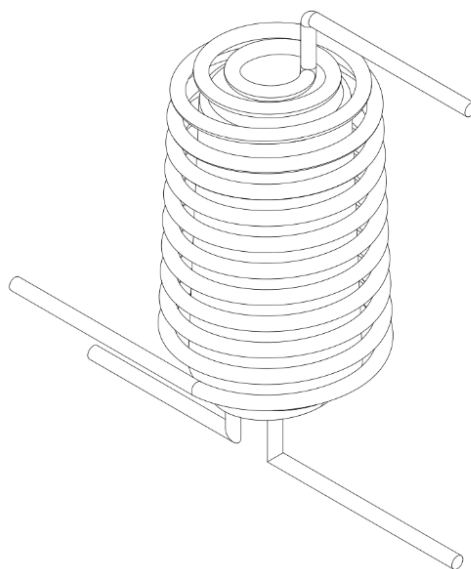


Figura 62 –Sistema de canais conformais otimizados (representação)

A seguir, em ambiente AMI®, foi aplicada uma malha ao conjunto formado pelo sistema de canais conformais otimizados e a peça. À semelhança da análise que tem vindo a ser realizada aquando da aplicação de uma malha tridimensional, também a mesma foi feita para este sistema de canais, estando as estatísticas da malha tetraédrica, na **Tabela 24**, de acordo com os valores recomendados para uma malha com estas características [69, 77].

A malha do sistema de canais é tetraédrica e na impossibilidade de selecionar um número de *Reynolds* específico, reviu-se o caudal anterior para 14,7 l/min (de água à temperatura de 90°C) permitindo assim um número de *Reynolds* de 10000. Esta diminuição do caudal permite uma potência de bombagem inferior à que seria necessária para o caudal anterior a esta revisão, que não é compensada com os ganhos na transferência de calor [86].

Relativamente à orientação do fluído, procedeu-se à exposta na **Figura 63**, ou seja, o sentido do fluído no sistema de canais conformais otimizados foi mantido conforme o estudo do sistema de canais conformais. A orientação do fluído no sistema de canais conformais otimizados da cavidade foi atribuída de forma à entrada se realizar próxima da região superior da peça. A malha de superfície foi criada e não tendo sido verificados quaisquer erros/problemas (lados livres, lados *manifold*, elementos não orientados corretamente ou interseções) e as razões de aspeto estarem de acordo com os valores recomendados, procedeu-se à criação da malha 3D [69].

Novamente, os extremos dos canais de arrefecimento, ou seja, as suas saídas e entradas, não ultrapassam a superfície do molde devido à interferência da malha dos canais com a malha da superfície do molde, pelo que se mantiveram estes extremos interiores à superfície mencionada com uma distância igual aos casos de estudo em que esta situação também se verificava.

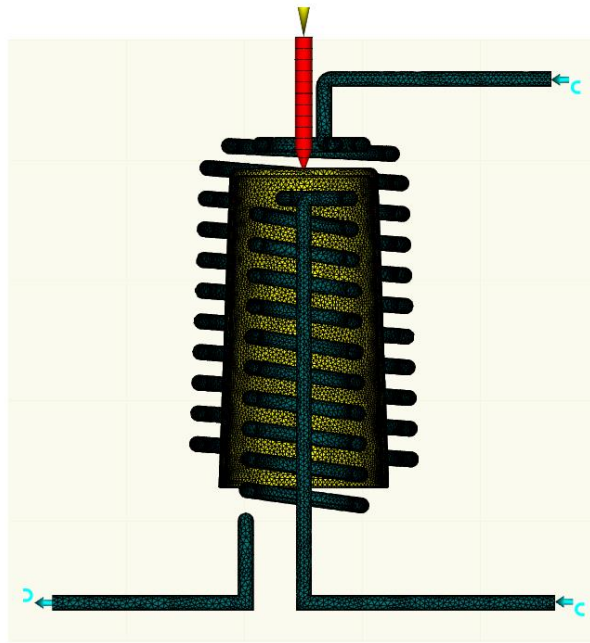


Figura 63 - Vista de lado em corte da disposição do sistema de canais conformais otimizados (a azul) e da peça (a amarelo)

Tabela 24 - Estatísticas da malha do sistema de canais conformais otimizados

Propriedade		Valor
Número de entidades- tetraedros		656970
Número de nós ligados		126686
Razão de aspeto	Máxima	71,84
	Média	6,50
	Mínima	1,06
Ângulo diédrico máximo		176,1

A malha do molde obtida tem as seguintes características, especificadas na **Tabela 25**. Os valores obtidos nas estatísticas da malha tetraédrica do molde obedecem aos recomendados para uma malha deste tipo, assim, após serem definidas as condições de processamento, é iniciada a análise [69, 77].

Assim e após serem definidas as condições de processamento, é iniciada a análise.

Tabela 25 - Estatísticas da malha do molde do caso de estudo otimizado

Propriedade		Valor
Número de entidades- tetraedros		2241599
Número de nós ligados		403457
Razão de aspeto	Máxima	53,95
	Média	3,38
	Mínima	1,03
Ângulo diédrico máximo		175,0

7.2. Resultados

Após a simulação deste caso de estudo otimizado, extraíram-se os resultados, nomeadamente, o tempo até atingir os requisitos de extração, a distribuição de temperatura e a deflexão, que já foram estudados anteriormente. Por se tratar de um estudo isolado, os resultados obtidos foram comparados com os seis casos de estudo executados anteriormente.

7.2.1. Tempo até atingir os requisitos de extração

O tempo até atingir os requisitos de extração para o caso de estudo otimizado está exposto no gráfico (ver **Figura 64**) junto aos respetivos valores dos estudos anteriores de modo a mais facilmente compreender o impacto que as modificações introduzidas tiveram neste tempo.

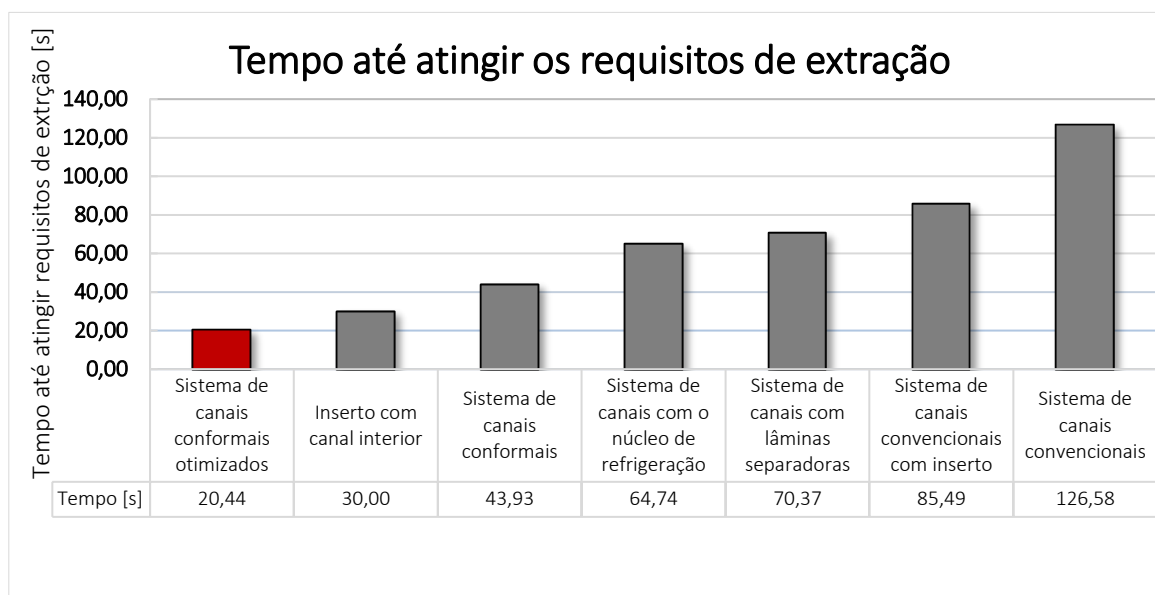


Figura 64 - Gráfico do tempo para atingir os critérios de extração pelas diferentes arquiteturas de arrefecimento com inclusão do caso de estudo otimizado

O tempo obtido representa uma redução de aproximadamente 32% e 53% relativamente aos tempos mais baixos dos casos de estudos anteriores, ou seja, o inserto com canal interior e o sistema de canais conformais, respetivamente. O tempo até atingir os requisitos de extração obtido pelo sistema de canais conformais otimizados equivale a um sexto do mesmo tempo na configuração do sistema de canais convencionais, pelo que a melhoria é muito considerável.

Assim sendo, o resultado é notável e são claras e indubitáveis as vantagens causadas por este sistema, de acordo com as condições e resultados analisados.

7.2.2. Distribuição de temperatura

Uma vez que neste caso de estudo os requisitos para a extração da peça foram atingidos aos 20,44s, não faria qualquer sentido observar e comparar as temperaturas no molde e na peça com o mesmo tempo selecionado previamente para o mesmo efeito. Assim, no caso do estudo otimizado, a análise das temperaturas do molde e a comparação entre as temperaturas da peça foi efetuada com o tempo referido no início, ou seja, 20,44s.

À semelhança dos resultados anteriores, verificou-se outro benefício do estudo otimizado, nomeadamente, um menor gradiente da temperatura no molde sobretudo nas regiões próximas da peça, conforme se pode verificar na **Figura 65**.

Não obstante de todo o cuidado na elaboração do sistema de canais conformais tanto na bucha como na cavidade de forma a providenciar soluções aos problemas verificados nos outros casos de estudo (com ênfase para o sistema de canais conformais), ainda é possível verificar alguma concentração de calor na extremidade arredondada da bucha e na região mais próxima do ataque. No entanto, realce-se que, por comparação com a **Figura 57**

relativa às temperaturas do molde do sistema de canais conformais, é possível concluir que ainda que esta região de concentração de calor continue a existir, agora tem uma área menor e as temperaturas são inferiores em quase 7°C face às temperaturas do sistema de canais conformais.

Ainda é possível apurar que todas as regiões próximas do sistema de canais conformais otimizados possuem uma temperatura muito próxima da temperatura do fluido circulante no mesmo, desempenhado a sua função de uma forma proeminente.

Relativamente à temperatura da peça, a sua variação ao longo da espessura para os pontos na base e na lateral da peça está graficamente representada na **Figura 66** e na **Figura 67**, respetivamente. Nos gráficos referidos foram comparados todos os resultados desta natureza de forma a uma melhor interpretação dos mesmos. Salienta-se que para essa comparação, a localização dos pontos para a análise da espessura é a mesma que a anterior (ver **Figura 58**), apenas diferindo o instante de tempo no qual é realizada (para o sistema de canais conformais otimizados).

A temperatura máxima ao longo da peça (nos pontos seleccionados) no caso de estudo otimizado é atingida precisamente a meio da espessura em estudo e corresponde a 119,4°C, comprovando novamente a uniformidade de temperatura entre a bucha e a cavidade já referida. Paralelamente, esta temperatura máxima está abaixo da temperatura de extração, conforme se pode ver na **Figura 66**, onde esta última foi representada através de uma linha horizontal. Para além disso, a diferença de temperatura entre a superfície da peça em contacto com a cavidade e a superfície em contacto com a bucha é inferior a 1°C na base e inferior a meio grau na lateral.

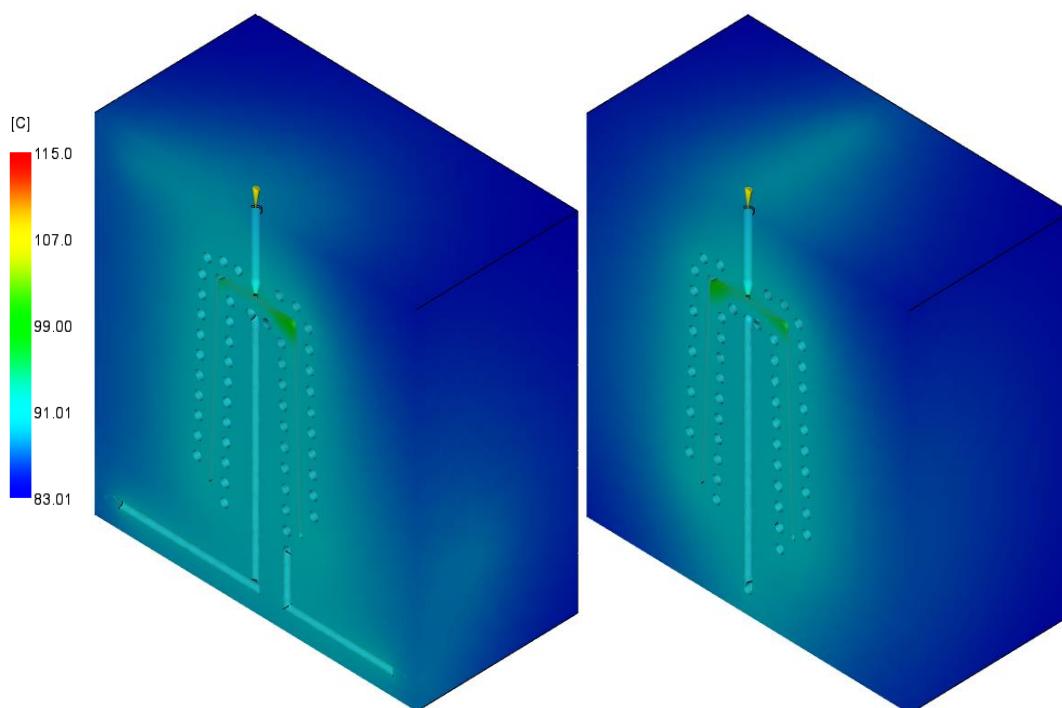


Figura 65 - Temperaturas no molde (em corte) do caso de estudo otimizado

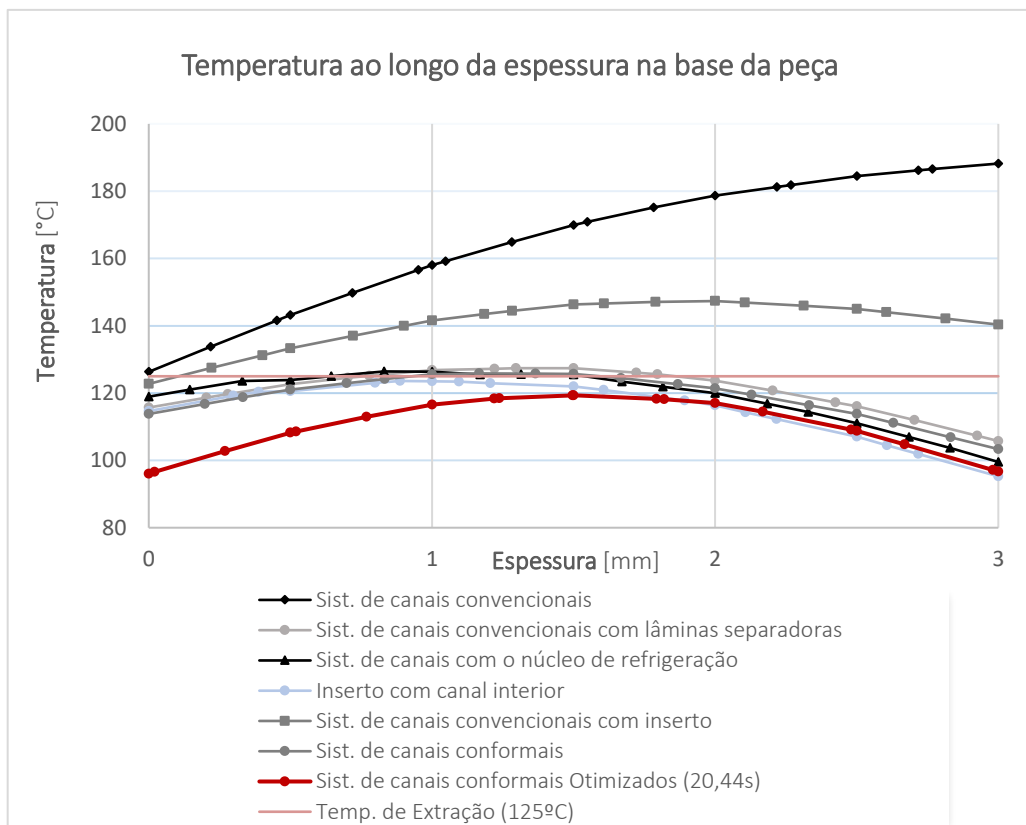


Figura 66 - Gráfico da temperatura ao longo da espessura na base da peça nas diferentes tipologias de arrefecimento inclusive o caso de estudo otimizado

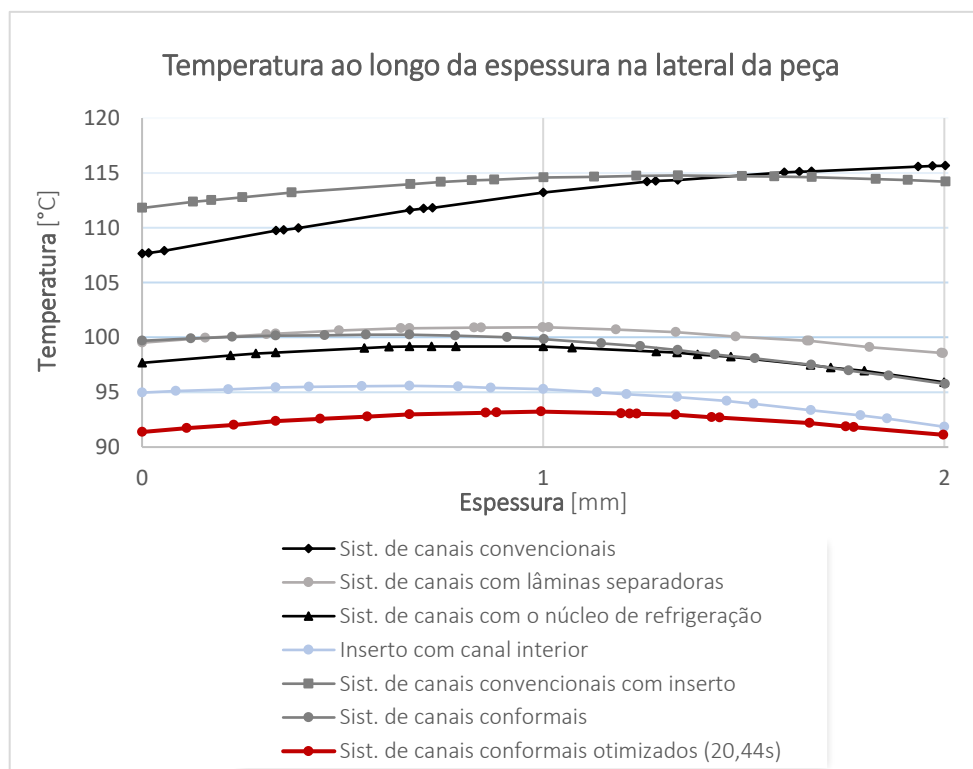


Figura 67 - Gráfico da temperatura ao longo da espessura na lateral da peça nas diferentes tipologias de arrefecimento inclusive o caso de estudo otimizado

7.2.3. Deflexão

Relativamente à deflexão, foi mantido o método utilizado anteriormente para obter a deflexão nas cotas críticas pelos efeitos de contração diferencial e arrefecimento diferencial.

Houve uma ligeira melhoria da deflexão causada por cada um destes efeitos (contração diferencial e arrefecimento diferencial), conforme pode ser observado na **Tabela 26** e no gráfico da **Figura 68**, no entanto, esse valor é ainda muito longe para se encontrar dentro do toleranciamento pré definido. Já a variação do diâmetro do ataque, pelo seu incremento, não proporcionou qualquer melhoria relativamente aos valores obtidos com o diâmetro definido inicialmente.

Estes valores reforçam ainda mais que, apesar da temperatura do molde estar praticamente uniforme, a deflexão causada é relativa a questões geométricas e a sua resolução não é conseguida com recurso a condições de processamento ou de temperatura. Assim valores vão de encontro ao que se antevia.

Tabela 26 - Tabela resumo das deflexões (em módulo) de cada geometria relativas ao efeito da contração diferencial e arrefecimento diferencial inclusive o caso de estudo otimizado

		Contração diferencial máxima [mm]	Ø ZY	Arrefecimento diferencial máximo [mm]	Ø ZY	Total [mm]
			Ø ZX Altura		Ø ZX Altura	
1º	Sist. de canais com o núcleo de refrigeração	0,75	0,49	0,01	0,00	0,76
			0,49		0,01	
			0,75		0,00	
2º	Sist. de canais com lâminas separadoras	0,76	0,49	0,01	0,00	0,77
			0,49		0,01	
			0,76		0,00	
3º	Sist. de canais convencionais com inserto	0,79	0,50	0,00	0,00	0,79
			0,50		0,00	
			0,79		0,00	
4º	Sist. de canais convencionais	0,78	0,49	0,01	0,01	0,79
			0,49		0,00	
			0,78		0,00	
5º	Inserto com canal interior	0,78	0,44	0,02	0,02	0,80
			0,51		0,01	
			0,78		0,00	
6º	Sist. de canais conformais otimizados	0,88	0,52	0,01	0,01	0,89
			0,53		0,00	
			0,88		0,00	
7º	Sist. de canais conformais	0,90	0,52	0,02	0,00	0,92
			0,52		0,02	
			0,90		0,00	

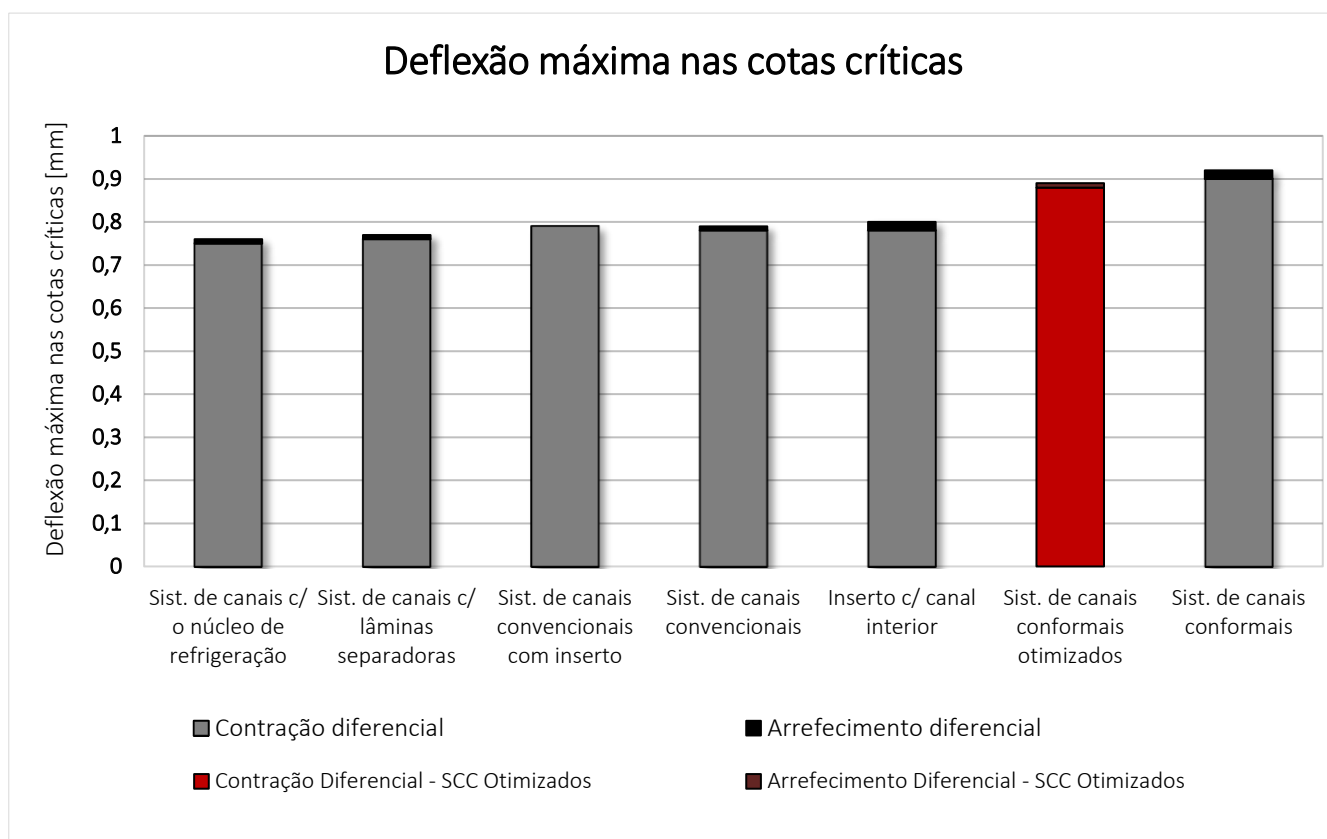


Figura 68 – Gráfico das deflexões máximas (em módulo) segundo cada geometria relativas ao efeito da contração diferencial e arrefecimento diferencial inclusive o caso de estudo otimizado

8. Conclusões

Neste trabalho foi criada a metodologia da análise e otimização do sistema de controlo de temperatura de uma cavidade moldante com recurso a canais conformais. Uma primeira abordagem iniciou-se com um levantamento daqueles que são os sistemas de controlo de temperatura universalmente utilizados neste processo de moldação por injeção e aprofundaram-se as características de cada, bem como as suas vantagens, desvantagens e a sua aplicabilidade. Um desses sistemas é o sistema de canais conformais, um sistema relativamente recente e inovador, uma vez que o seu desenvolvimento está diretamente associado ao desenvolvimento dos processos aditivos para o fabrico de moldes.

Para investigar alguns dos benefícios resultantes da aplicação destes canais, foram criados seis casos de estudo diferentes, de forma a contemplar a maioria dos sistemas de arrefecimento mais utilizados (pela indústria), bem como um deles representativo da tecnologia conformal. O objetivo destes casos de estudo foi simular em ambiente AMI® o arrefecimento do molde num processo de moldação por injeção de uma peça com uma geometria desafiante na perspetiva de extração de calor. Para além desta abordagem ter permitido uma comparação entre as diferentes tipologias em estudo numa ótica global, permitiu ainda uma análise de cada um dos casos de estudo numa ótica particular.

Ainda que pudessem ter sido extraídos mais dados para comparação, foram selecionados aqueles que têm uma maior relevância, nomeadamente: o tempo até os critérios de extração serem atingidos, a distribuição de temperatura no molde e na peça e a deflexão. Os resultados obtidos permitiram estabelecer relações sobre cada uma das diferentes estratégias, mas principalmente apurar que a tecnologia conformal obteve uma clara vantagem sobre a maioria das estratégias convencionais no que diz respeito ao tempo estudado e a temperatura. Com base nestes estudos foi desenvolvido o caso de estudo otimizado, caso em que a tecnologia de canais conformais foi novamente utilizada pois foi perceptível que as suas potencialidades não estavam a ser aproveitadas da melhor forma. O culminar de todo o trabalho de simulação e investigação despendido na realização deste projeto permitiu obter os resultados que representam uma melhor uniformidade térmica entre a bucha e a cavidade num tempo inferior em 32% face ao melhor caso de estudo conduzido anteriormente.

Em relação à deflexão, o uso do sistema de canais conformais não permitiu cumprir com o toleranciamento pré-definido, e o caso de estudo otimizado também não. No entanto, os resultados de deflexão por efeito da contração diferencial são no geral próximos nos diferentes casos de estudo e a deflexão causada por arrefecimento diferencial é comparativamente insignificante. Não obstante de referir, que foram feitas várias tentativas de melhoria toleranciamento com recurso à alteração das condições de processamento. No entanto, não foram verificadas melhorias significantes, tornando-se evidente que a geometria da peça é a única possível responsável por esta deflexão. Assim, para poderem ser obtidas conclusões mais concretas relativas à influência da deflexão em função do sistema de arrefecimento selecionado, é necessário que essa análise seja realizada com uma peça diferente. Volta a recordar-se que foi selecionada uma peça com esta geometria por aliar uma série de características problemáticas em termos de extração de calor à

simplicidade. Esta simplicidade é própria de se tratar de uma primeira abordagem ao programada de simulação numérica AMI[®], sendo esta também um dos objetivos desta dissertação.

Ainda assim, o valor máximo de deflexão é um valor muito reduzido (considerando a ordem de grandeza), e deste modo, as evidentes vantagens da utilização desta tecnologia sobrepõe-se claramente a este valor. Visto que, não obstante, dos requisitos estéticos, não se trata de uma peça técnica ou de uma peça que faz parte de uma montagem, estipula-se que a maior cadência de produção é mais profícua e rentável a uma conformidade com o toleranciamento para esta peça em particular.

Os resultados obtidos são de fato muito encorajadores no sentido das mais valias demonstradas pela utilização desta tecnologia, no entanto, sublinha-se estes que resultados estão numa conjuntura numérica. De modo a serem obtidos resultados ainda mais próximos do real é requerida uma conjuntura experimental para complementar a numérica. Existem uma série de premissas e assunções anteriormente mencionadas, que ainda não sendo relevantes para o estudo desenvolvido, serão certamente num estudo experimental e supõe-se que irão levar à variação dos resultados.

As razões para possíveis divergências entre os resultados numéricos e experimentais podem dever-se ao facto de terem sido utilizadas apenas regras projetuais para o desenho das configurações de arrefecimento. Regras essas relativas a distâncias entre os elementos da própria configuração e da mesma aos limites impostos pelo volume de controlo (volume da placa da cavidade e da bucha) não contemplando, por exemplo, o sistema de extração e as guias. Do mesmo modo, o material constituinte do molde foi o aço P20 aquando da implementação da tecnologia conformal, tendo este molde características muito diferentes (do ponto de vista da condutividade térmica, dureza e propriedades mecânicas, entre outros) perante os moldes obtidos por tecnologias aditivas. Mesmo se fossem contabilizados, todos os limites impostos pelos constituintes do molde e se a malha tivesse em conta as propriedades do material do molde proveniente dos processos aditivos (nos casos dos canais conformais), não pode ser omissa que num panorama de simulação numérica existe sempre um distanciamento próprio da prática.

Deve ser mencionado também que é necessário considerar o fator económico, porque as diferentes configurações de arrefecimento permitem obter resultados diferentes a custos também muito diferentes, sendo este o aspeto mais negativo da tecnologia conformal.

Assim, embora os benefícios sejam muito superiores face aos sistemas comumente utilizados no sistema de arrefecimento, com a utilização desta tecnologia inovadora no processo de moldação por injeção desta peça, é necessário um estudo de impacto financeiro aliado a uma avaliação experimental de forma a dar resposta a todas estas questões. Deste modo, não há qualquer dúvida que a incorporação da tecnologia conformal no panorama atual da indústria de moldes irá permitir uma evolução no processo de fabrico de peças poliméricas.

9. Trabalhos Futuros

No desenvolvimento desta dissertação, houve uma série de pontos que foram alvo de estudo, no entanto, e devido à inexequibilidade de serem todos abordados, são apresentados de seguida alguns que ao serem alvo de estudo, permitem justamente um maior conhecimento e um constante desenvolvimento de uma tecnologia certamente mais presente no futuro da indústria de moldes. É assim possível complementar e proceder a um estudo mais profundo ao abordado nesta dissertação. Neste sentido, destacam-se os seguintes:

- Proceder à criação de um protótipo para um estudo experimental, comparando os resultados e os valores obtidos;
- Proceder aos mesmos casos de estudo apresentados, mas com uma peça diferente, com maior complexidade, comparando os resultados obtidos;
- Proceder aos mesmos casos de estudo apresentados, mas o molde importado como CAD (do AIP[®], por exemplo) comparando os resultados obtidos;
- Estudar as propriedades termomecânicas do molde com vários materiais, com especial atenção às características das estruturas moldantes resultantes de tecnologias aditivas;
- Estudar a evolução das estruturas moldantes obtidas com recurso a tecnologias aditivas, avaliando o seu desgaste e manutenção necessária segundo o número de ciclos realizados pelas mesmas;
- Otimização, com recurso a meios para esse fim, de uma configuração conformal no qual fossem avaliadas a influência de cada um dos diferentes parâmetros no processo de controlo de temperatura;
- Proceder a uma análise transiente desde o arranque com os mesmos casos de estudo, avaliando a variação de temperatura do molde ao fim de um ciclo de moldação relativamente à temperatura estável atingida após vários ciclos.

(Esta página foi intencionalmente deixada em branco)

10. Referências

1. Gaspar, R., et al., *Fabricação Aditiva*, in *O MOLDE Nº105*. 2015. p. 26-34.
2. CEFAMOL. *Indústria de Moldes (História do Setor)*. 2017 [cited 2019 26/02]; Available from: <https://www.cefamol.pt/index.php?id=29>.
3. Moldes, C.A.N.d.I.d., *Industria Portuguesa de Moldes'19 - Report*. 2019. p. 10.
4. Spina, R., *Injection moulding of automotive components: comparison between hot runner systems for a case study*. Journal of Materials Processing Technology, 2004. **155-156**: p. 1497-1504.
5. Cho, K.-J., et al., *Review of manufacturing processes for soft biomimetic robots*. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2009. **10**(3): p. 171-181.
6. Lin, J.C., *Optimum cooling system design of a free-form injection mold using an abductive network*. Journal of Materials Processing Technology, 2002. **120**(1): p. 226-236.
7. Rännar, L.-E., *On Optimization of Injection Molding Cooling*, in *Department of Engineering Design and Materials*. 2008, Norwegian University of Science and Technology, Faculty of Engineering Science and Technology. p. 150.
8. Beaumont, J.P., R. Nagel, and R. Sherman, *Successful injection molding : process, design, and simulation*. 2002, Munich: Hanser Publishers ; Cincinnati : Hanser Gardner Publications.
9. Menges, G., W. Michaeli, and P. Mohren, *How to make injection mold*. 2000, Hanser Publishers, Munich.
10. Saifullah, A. and S. Masood, *Finite Element Thermal Analysis of Conformal Cooling Channels in Injection Moulding*, in *Proceedings of the 5th Australasian Congress on Applied Mechanics*, M. Veidt, Editor. 2007: Brisbane, Australia. p. 337-341.
11. Zink, B., et al., *Enhanced Injection Molding Simulation of Advanced Injection Molds*. Polymers, 2017. **9**(12): p. 77.
12. Park, S.J. and T.H. Kwon, *Optimal cooling system design for the injection molding process*. Polymer Engineering & Science, 1998. **38**(9): p. 1450-1462.
13. Zhou, H. and D. Li, *Mold cooling simulation of the pressing process in TV panel production*. Simulation Modelling Practice and Theory, 2005. **13**(3): p. 273-285.
14. coord. Centimfe - Centro Tecnológico da Indústria de Moldes, F.E.e.P.c.c.d.U.d.M., *Manual do projectista para moldes de injeção de plástico*. Centimfe - Centro Tecnológico da Indústria de Moldes Ferramentas Especiais e Plásticos ed. 2003, Marinha Grande: Centimfe.
15. Rännar, L.E., A. Glad, and C.G. Gustafson, *Efficient cooling with tool inserts manufactured by electron beam melting*. Rapid Prototyping Journal, 2007. **13**(3): p. 128-135.
16. Upmold. *Injection Mold Cooling Design*. 2017 [cited 2019 2/07]; Available from: <https://upmold.com/injection-mold-cooling-design/>.
17. Kazmer, D., *Injection Mold Design Engineering*. 2nd ed. 2016: Hanser Publications. 529.
18. Fischer, J.M., *Handbook of Molded Part Shrinkage and Warpage*. 2nd ed. 2012. 1-273.
19. Rännar, L.-E. and C.-G. Gustafson, *Improvement in Surface Heat Distribution of Injection Molding Tooling Using Conformal Cooling Channels*. Journal of Manufacturing Science and Engineering.
20. Marques, S., et al., *Design of conformal cooling for plastic injection moulding by heat transfer simulation*. Polímeros, 2015. **25**(6): p. 564-574.
21. Park, H.-S. and X.-P. Dang, *Development of a Smart Plastic Injection Mold with Conformal Cooling Channels*. Procedia Manufacturing, 2017. **10**: p. 48-59.

22. ASTM, I., *ISO / ASTM52900 - 15*, in *Standard Terminology for Additive Manufacturing – General Principles – Terminology*. 2015, BSI Standards Limited 2016. p. 25.
23. International, A., *ASTM F2792-12a*, in *Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies, (Withdrawn 2015)*. 2012: West Conshohocken.
24. Reis, N.C.R., *Aplicabilidade do Fabrico Aditivo na Indústria dos Moldes de Injeção*. 2017, Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria. p. 112.
25. Group, A.M.R. *About Additive Manufacturing - The 7 Categories of Additive Manufacturing*. [cited 2019 1/09]; Available from: <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/>.
26. Relvas, C.A.M., *Design & Engenharia: da ideia ao produto*. 2017. 361.
27. Santos, L., et al., *Binder system for fused deposition of metals*. International Powder Metallurgy Congress and Exhibition, Euro PM 2013, 2013. **2**: p. 79-84.
28. Safdar, A., *Microstructures and surface roughness of EBM produced Ti-6Al-4V*, in *Department of Construction Sciences*. 2010, Malmö University. p. 71.
29. *EBM® Electron Beam Melting – in the forefront of Additive Manufacturing*. [cited 2019 2/10]; Available from: <http://www.arcam.com/technology/electron-beam-melting/>.
30. Saracco, R., *Digital transformation in Manufacturing II*. 2019.
31. *Laser sintering, melting and others – SLS, SLM, DMLS, DMP, EBM, SHS*. 2017.
32. Shayfull, Z., et al., *Potential of Conformal Cooling Channels in Rapid Heat Cycle Molding: A Review*. *Advances in Polymer Technology*, 2014. **33**(1).
33. Xu, X., E. Sachs, and S. Allen, *The design of conformal cooling channels in injection molding tooling*. *Polymer Engineering & Science*, 2001. **41**(7): p. 1265-1279.
34. Dang, X.-P. and H.-S. Park, *Design of U-shape milled groove conformal cooling channels for plastic injection mold*. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2011. **12**(1): p. 73-84.
35. Shoemaker, J., *Moldflow Design Guide: A Resource for Plastics Engineers*. 2006, Munich: Hanser ; Cincinnati : Hanser Gardner Publications.
36. Rännar, L.-E., *Efficient Cooling of FFF Injection Molding Tools with Conformal Cooling Channels, : An Introductory Analysis*, in *1st International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping, VRAP 2003; Leiria; Portugal; 1 October 2003 through 4 October 2003; Code 84673*. 2003, Escola Superior de Tecnologia e Gestão: Leiria. p. 433-437.
37. Rännar, L.-E. and C.-G. Gustafson, *An Investigation of Optimal Process Settings in Injection Molding Using Inserts Manufactured by Rapid Tooling*. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*: p. 15.
38. Gibbons, G.J. and R.G. Hansell, *Direct tool steel injection mould inserts through the Arcam EBM free-form fabrication process*. *Assembly Automation*, 2005. **25**(4): p. 300-305.
39. Wimpenny, D.I., B. Bryden, and I.R. Pashby, *Rapid laminated tooling*. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003. **138**(1): p. 214-218.
40. Sachs, E., et al., *Production of injection molding tooling with conformal cooling channels using the three dimensional printing process*. *Polymer Engineering & Science*, 2000. **40**(5): p. 1232-1247.
41. Patel, S.P. and S. S., *A Simulation Study of Conformal Cooling Channels in Plastic Injection Molding*. *International Journal of Engineering Development and Research*, 2017. **5**(1): p. 13.
42. Patil, R.P., N.K. Patil, and J.R. Surange, *A Review on Cooling System Design for Performance Enhancement of Injection Molding Machine*. *International Conference on Global Trends in Engineering, Technology and Management*, 2016: p. 8.
43. Reis, N., J. Vasco, and F.M. Barreiros, *Conformal cooling by SLM to improve injection moulding*. 2018.

44. Park, H.-S. and X.-P. Dang, *Optimization of conformal cooling channels with array of baffles for plastic injection mold*. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2010. **11**(6): p. 879-890.
45. Park, H.-S. and X.-P. Dang, *Design and Simulation-Based Optimization of Cooling Channels for Plastic Injection Mold*, in *New Technologies - Trends, Innovations and Research*, P.C. Volosencu, Editor. 2012, InTech. p. 19-44.
46. Saifullah, A.B.M., I. Sbarski, and S.H. Masood, *New Cooling Channel Design for Injection Moulding*. World Congress on Engineering 2009, 2009. I.
47. Minh, P.S. and T.M.T. Uyen, *Numerical Study on the Helical Cooling Channel for Injection Molding Process*. IJSET - International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology, 2018. **5**(2).
48. Sun, Y.F., K.S. Lee, and A.Y.C. Nee, *Design and FEM analysis of the milled groove insert method for cooling of plastic injection moulds*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2004. **24**(9-10): p. 715–726.
49. Ilyas, I., et al., *Design and manufacture of injection mould tool inserts produced using indirect SLS and machining processes*. Rapid Prototyping Journal, 2010. **16**(6): p. 429-440.
50. Altaf, K., A.-M. Abdul-Rani, and V. Raghavan, *Comparative Thermal Analysis of Circular and Profiled Cooling Channels for Injection Mold Tools*. Journal of Applied Sciences, 2011. **11**: p. 2068-2071.
51. Altaf, K., A.-M. Abdul-Rani, and V.R. Raghavan, *Prototype production and experimental analysis for circular and profiled conformal cooling channels in aluminium filled epoxy injection mould tools*. Rapid Prototyping Journal, 2012. **19**: p. 220-229.
52. Jahan, S.A. and H. El-Mounayri, *Optimal Conformal Cooling Channels in 3D Printed Dies for Plastic Injection Molding*. Procedia Manufacturing, 2016. **5**: p. 888-900.
53. Jahan, S.A., et al., *Thermo-mechanical Design Optimization of Conformal Cooling Channels using Design of Experiments Approach*. Procedia Manufacturing, 2017. **10**: p. 898-911.
54. Liu, J., et al., *Fully Coupled Transient Heat Transfer and Melt Filling Simulations in Rapid Heat Cycle Molding with Steam Heating*. Polymer-Plastics Technology and Engineering, 2011. **50**(4): p. 423-437.
55. Kitayama, S., et al., *Optimization of mold temperature profile and process parameters for weld line reduction and short cycle time in rapid heat cycle molding*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019. **103**(5-8): p. 1735–1744.
56. Kuo, C.-C. and Z.-F. Jiang, *Numerical and experimental investigations of a conformally cooled maraging steel injection tool fabricated by direct metal printing*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019. **93**(5-8): p. 2081-2088.
57. *COPO PLÁSTICO PERSONALIZADO LONG DRINK*. 2015 [cited 2019 17/07]; Copos Long Drink 310 ml Personalizados translúcidos ou leitosos com várias opções de cores e parede super resistentes [gravação em Silk ou Tampografia]. Available from: <https://www.allpen.com.br/copo-plastico-personalizado-long-drink>.
58. Eyerer, P., *Plastics: Classification, Characterization, and Economic*. 2010. p. 19-46.
59. Brinson, H.F. and L.C. Brinson, *Polymer Engineering Science and Viscoelasticity An Introduction*. 2008: Springer, Boston, MA. 455.
60. JD. *The Differences Between Acrylic and Polycarbonate*. 2018 [cited 2019 20/07]; Available from: <https://www.theplasticpeople.co.uk/blog/the-differences-between-acrylic-and-polycarbonate/>.
61. Industry, S.o.t.P., *SPI Plastics Engineering Handbook of the Society of the Plastics Industry, Inc*. 5th ed. 1991: Kluwer Academic Publishers. 869.
62. Cheng, S. *transparent plastic injection molding-PC, PMMA and PET*. [cited 2019 22/07]; Available from: <https://www.plasticmoulds.net/transparent-plastic-injection-molding.html>.
63. Campo, E.A., *The Complete Part Design Handbook*

- For Injection Molding of Thermoplastics*. 2006: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG. 891.
64. SABIC. *POLYCARBONATE (PC) LEXAN™ RESIN*. 2019 [cited 2019 23/07]; Available from: <https://www.sabic.com/en/products/polymers/polycarbonate-pc/lexan-resin>.
 65. SABIC, *LEXAN RESIN 103R*. 2019, SABIC. p. UL rated HB as of 10/97. 200 series recommended when V-2 rating required. Nonhalogenated. 7.0 MFR, for thicker sections without sinks. UV Stabilized for outdoor and lighting. Internal mold release.
 66. Rosato, D.V., D.V. Rosato, and M.G. Rosato, *Injecion Molding Handbook*. Third Edition ed. 2000: Kluwer Academic Publishers.
 67. Insight, A.K.N.M. *Moldflow: Recommended mesh size for different mesh types*. 2017; Available from: <https://knowledge.autodesk.com/support/moldflow-insight/learn-explore/caas/sfdcarticles/sfdcarticles/Moldflow-Recommended-mesh-size-for-different-mesh-types.html>.
 68. Insight, A.K.N.M. *Mesh statistics*. 2015 [cited 2019 17/08]; Available from: <https://knowledge.autodesk.com/support/moldflow-insight/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2016/ENU/MoldflowInsight/files/GUID-41F38EA2-A28F-4A0F-8069-3480E24B3F11-htm.html?st=aspect%20ratio%20values>.
 69. Insight, A.K.N.M. *Mesh Requirements Summarized*. 2016 [cited 2019 17/8]; Available from: <https://knowledge.autodesk.com/support/moldflow-insight/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2017/ENU/3PP-MDF-INSFUND-ASCENT/files/GUID-7D0B0B0F-C427-4DD3-ADC4-7620B9FDF18D-htm.html>.
 70. Tadmor, Z. and C.G. Gogos, *Principles of Polymer Processing*. 2nd ed. 2006: John Wiley & Sons, Inc. 984.
 71. Insight, A.K.N.M. *Coolant flow*. 2017 [cited 2019 16/09]; Available from: <https://knowledge.autodesk.com/support/moldflow-insight/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2018/ENU/MoldflowInsight/files/GUID-C793108A-2E9E-468D-B6D5-3FC88868A2BD-htm.html>.
 72. HASCO®. *HASCO® Enabling with System*. 2019 [cited 2019 3/05]; Available from: <https://www.hasco.com/pt/>.
 73. GmbH+CoKG, H.H., *Techni Shot H33../... Heißkanaldüse Hotrunner nozzle Buse à canal chaud H34../... Mono-Düse Mono nozzle Monobuse*. 2016.
 74. Parmar, K.C. and D.H. Kaiser, *Comparison Of Simulation Results When Using Two Different Methods For Mold Creation In Moldflow Simulation*. INTERNATIONAL JOURNAL OF SCIENTIFIC & TECHNOLOGY RESEARCH, 2017. **6**(04): p. 4.
 75. Costa, F. and P. WRIGHT, *Transient and Conformal Mold Cooling Simulation*, in *AUTODESK UNIVERSITY*. 2011.
 76. AMPCO®, *AMPCO® HIGH CONDUCTIVITY COPPER ALLOYS FOR PLASTIC INJECTION AND BLOW MOLDING*. 2014.
 77. Insight, A.K.N.M. *Mesh optimization*. 2018 [cited 2019 17/8]; Available from: <https://knowledge.autodesk.com/support/moldflow-insight/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2019/ENU/MoldflowInsight-Modelprep/files/GUID-95F30027-E4B5-45A7-B02B-F332B640A6E7-htm.html>.
 78. Insight, A.K.N.M. *Baffles(Concept)*. 2017 [cited 2019 30/10]; Available from: <https://knowledge.autodesk.com/support/moldflow-insight/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2017/ENU/MoldflowInsight/files/GUID-960FD6FF-558B-49CF-A32C-99116E4593E7-htm.html>.
 79. Insight, A.K.N.M. *Bubblers(Concept)*. 2017 [cited 2019 2/11]; Available from: <https://knowledge.autodesk.com/support/moldflow-insight/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2018/ENU/MoldflowInsight-Modelprep/files/GUID-B2B7A6CF-68DB-404F-8253-6C55A34C518F-htm.html>.

80. Insight, A.K.N.M. *Bubblers, modeling (Procedure)*. 2017 [cited 2019 2/11]; Available from: <https://knowledge.autodesk.com/support/moldflow-insight/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2018/ENU/MoldflowInsight-Modelprep/files/GUID-89E3988B-322F-4BE4-BBE3-DA35D2CDC507-htm.html>.
81. Insight, A.K.N.M. *Mesh on assembly contact faces*. 2017 [cited 2019 6/11]; Available from: <https://knowledge.autodesk.com/support/moldflow-insight/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2018/ENU/MoldflowInsight/files/GUID-806F51C5-4A79-465B-813E-703F1854A982-htm.html>.
82. Insight, A.K.N.M. *Contact stitching for inserts and cores (Concept)*. 2017 [cited 2019 8/11]; Available from: <https://knowledge.autodesk.com/support/moldflow-insight/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2018/ENU/MoldflowInsight/files/GUID-B9E40723-9E33-4F2D-8CAE-775213FC55F5-htm.html>.
83. GmbH+CoKG, H.H., *Temperier-System/Cooling system/Système de refroidissement/de chauffe*. 2018.
84. SLM Solutions NA, I., *Case Study-Conformal Cooling for Tooling Inserts*
3D Printing of tooling parts with conformal cooling channels
Potential of additive manufacturing for tooling and molding, in *Form Case Report ABB Rel. 01*. 2016. p. 6.
85. Mayer, S., *Optimised mould temperature control procedure using DMLS*. EOS Whitepaper, EOS GmbH Ltd, 2009: p. 1-10.
86. Insight, A.K.N.M. *Reynolds number*. 2017 [cited 2019 1/11]; Available from: <https://knowledge.autodesk.com/support/moldflow-insight/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2017/ENU/MoldflowInsight/files/GUID-D60089A4-E990-49AF-897B-9243C428A384-htm.html>.

(Esta página foi intencionalmente deixada em branco)

11. Anexos

ANEXO A - Ficha técnica do Material Polimérico utilizado na peça em estudo



LEXANTM RESIN 103R

REGION EUROPE

DESCRIPTION

UL rated HB as of 10/97. 200 series recommended when V-2 rating required. Nonhalogenated. 7.0 MFR, for thicker sections without sinks. UV Stabilized for outdoor and lighting. Internal mold release.

TYPICAL PROPERTY VALUES

Revision 20190709

PROPERTIES	TYPICAL VALUES	UNITS	TEST METHODS
MECHANICAL			
Taber Abrasion, CS-17, 1 kg	10	mg/1000cy	SABIC method
Tensile Stress, yield, 50 mm/min	63	MPa	ISO 527
Tensile Stress, break, 50 mm/min	70	MPa	ISO 527
Tensile Strain, yield, 50 mm/min	6	%	ISO 527
Tensile Strain, break, 50 mm/min	120	%	ISO 527
Tensile Modulus, 1 mm/min	2350	MPa	ISO 527
Flexural Stress, yield, 2 mm/min	90	MPa	ISO 178
Flexural Modulus, 2 mm/min	2300	MPa	ISO 178
Ball Indentation Hardness, H358/30	95	MPa	ISO 2039-1
IMPACT			
Izod Impact, unnotched 80°10°3 +23°C	NB	kJ/m²	ISO 180/1U
Izod Impact, unnotched 80°10°3 -30°C	NB	kJ/m²	ISO 180/1U
Izod Impact, notched 80°10°3 +23°C	70	kJ/m²	ISO 180/1A
Izod Impact, notched 80°10°3 -30°C	12	kJ/m²	ISO 180/1A
Charpy 23°C, V-notch Edgew 80°10°3 sp=62mm	75	kJ/m²	ISO 179/1eA
Charpy -30°C, V-notch Edgew 80°10°3 sp=62mm	15	kJ/m²	ISO 179/1eA
Charpy 23°C, Unnotch Edgew 80°10°3 sp=62mm	NB	kJ/m²	ISO 179/1eU
Charpy -30°C, Unnotch Edgew 80°10°3 sp=62mm	NB	kJ/m²	ISO 179/1eU
Charpy Impact, notched, 23°C	35	kJ/m²	ISO 179/2C
THERMAL			
Thermal Conductivity	0.2	W/m·°C	ISO 8302
CTE, 23°C to 80°C, flow	7.E-05	1/°C	ISO 11359-2
Ball Pressure Test, 125°C +/- 2°C	PASSES	-	IEC 60695-10-2
Ball Pressure Test, approximate maximum	140	°C	IEC 60695-10-2
Vicat Softening Temp, Rate B/50	144	°C	ISO 306
Vicat Softening Temp, Rate B/120	145	°C	ISO 306
HDT/Be, 0.45MPa Edgew 120°10°4 sp=100mm	138	°C	ISO 75/Be
HDT/Ae, 1.8 MPa Edgew 120°10°4 sp=100mm	127	°C	ISO 75/Ae
Relative Temp Index, Elec	130	°C	UL 746B
Relative Temp Index, Mech w/ impact	130	°C	UL 746B
Relative Temp Index, Mech w/o impact	130	°C	UL 746B
PHYSICAL			
Mold Shrinkage on Tensile Bar, flow	0.5 – 0.7	%	SABIC method
Density	1.2	g/cm³	ISO 1183

© 2019 Copyright by SABIC. All rights reserved

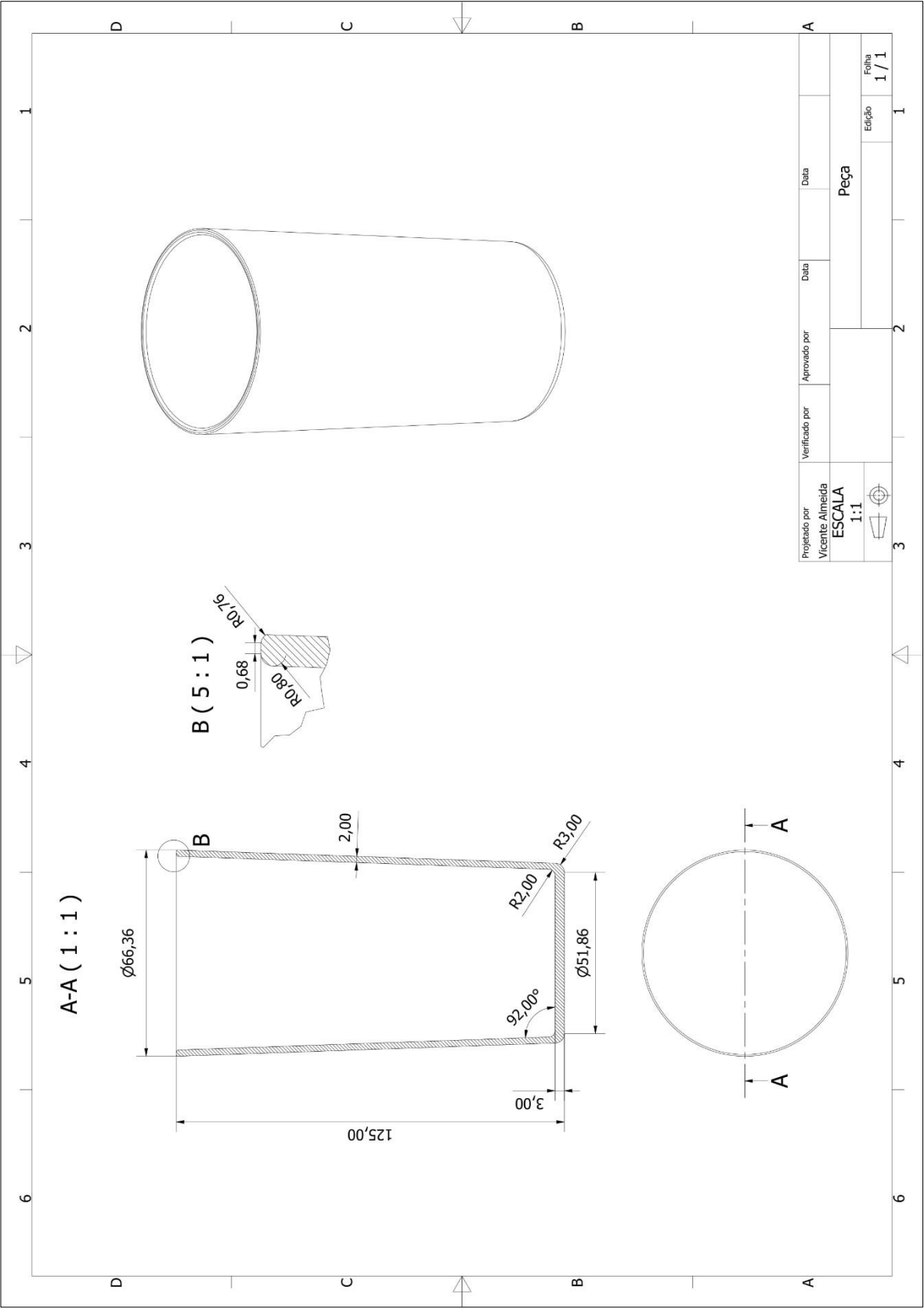
CHEMISTRY THAT MATTERS[™]

PROPERTIES	TYPICAL VALUES	UNITS	TEST METHODS
Water Absorption, (23°C/sat)	0.35	%	ISO 62
Moisture Absorption (23°C / 50% RH)	0.15	%	ISO 62
Melt Volume Rate, MVR at 300°C/1.2 kg	6	cm ³ /10 min	ISO 1133
OPTICAL			
Light Transmission, 2.54 mm	88 – 90	%	ASTM D 1003
Haze, 2.54 mm	<0.8	%	ASTM D 1003
Refractive Index	1.586	-	ISO 489
ELECTRICAL			
Volume Resistivity	>1.E+15	Ohm-cm	IEC 60093
Surface Resistivity, ROA	>1.E+15	Ohm	IEC 60093
Dielectric Strength, in oil, 3.2 mm	17	kV/mm	IEC 60243-1
Relative Permittivity, 1 MHz	2.7	-	IEC 60250
Dissipation Factor, 50/60 Hz	0.001	-	IEC 60250
Dissipation Factor, 1 MHz	0.01	-	IEC 60250
Relative Permittivity, 50/60 Hz	2.7	-	IEC 60250
FLAME CHARACTERISTICS			
UL Yellow Card Link	E45329-103028646	-	-
UL Yellow Card Link 2	E45329-103028647	-	-
UL Recognized, 94HB Flame Class Rating	0.75	mm	UL 94
UL Recognized, 94HB Flame Class Rating 2nd value	3	mm	UL 94
Glow Wire Flammability Index 850°C, passes at	1	mm	IEC 60695-2-12
Oxygen Index (LOI)	25	%	ISO 4589
INJECTION MOLDING			
Drying Temperature	120	°C	
Drying Time	2 – 4	hrs	
Maximum Moisture Content	0.02	%	
Melt Temperature	290 – 320	°C	
Nozzle Temperature	280 – 310	°C	
Front - Zone 3 Temperature	290 – 320	°C	
Middle - Zone 2 Temperature	280 – 310	°C	
Rear - Zone 1 Temperature	270 – 300	°C	
Hopper Temperature	60 – 80	°C	
Mold Temperature	80 – 120	°C	

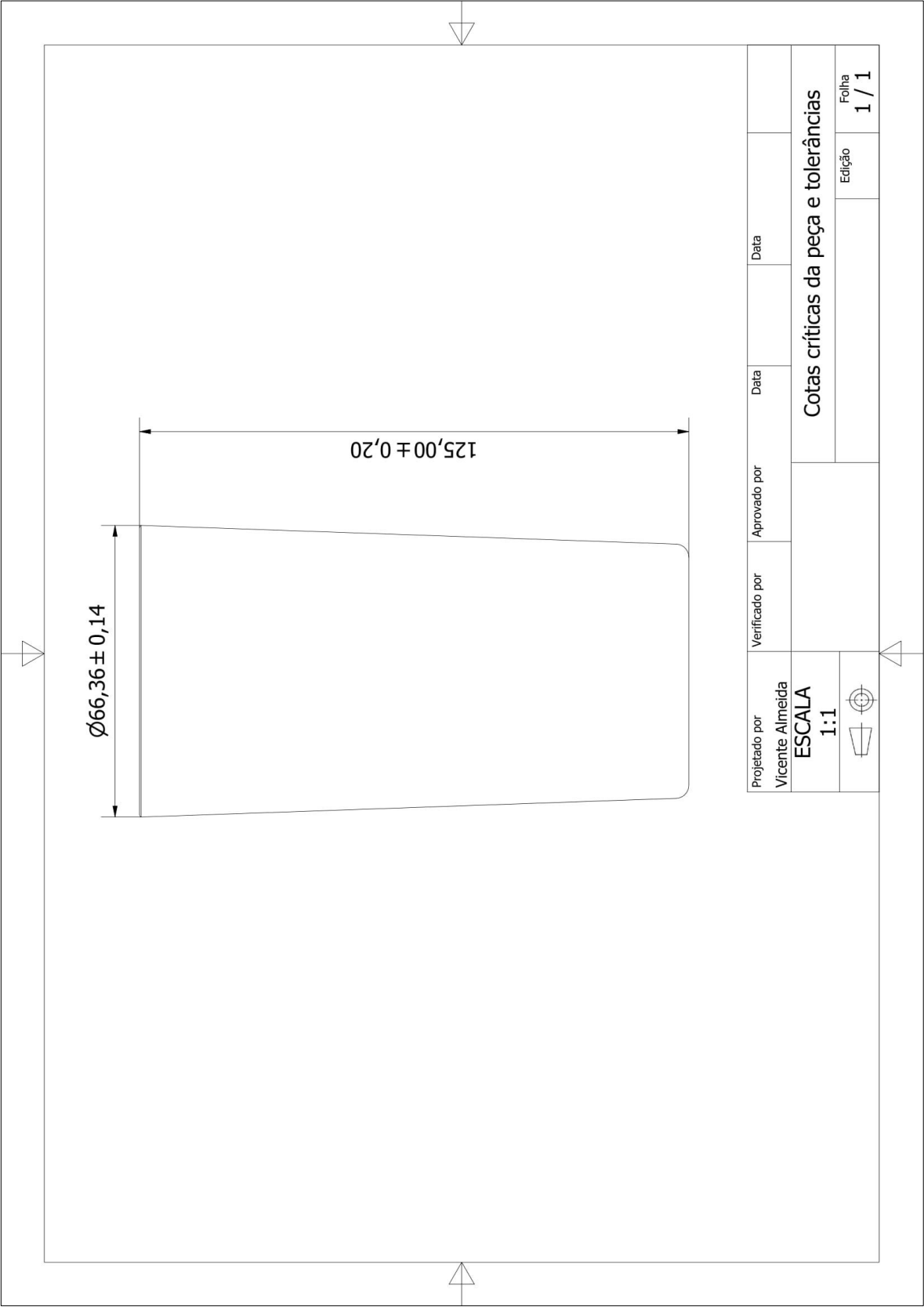
DISCLAIMER

Any sale by SABIC, its subsidiaries and affiliates (each a "seller"), is made exclusively under seller's standard conditions of sale (available upon request) unless agreed otherwise in writing and signed on behalf of the seller. While the information contained herein is given in good faith, SELLER MAKES NO WARRANTY, EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING MERCHANTABILITY AND NON-INFRINGEMENT OF INTELLECTUAL PROPERTY, NOR ASSUMES ANY LIABILITY, DIRECT OR INDIRECT, WITH RESPECT TO THE PERFORMANCE, SUITABILITY OR FITNESS FOR INTENDED USE OR PURPOSE OF THESE PRODUCTS IN ANY APPLICATION. Each customer must determine the suitability of seller materials for the customer's particular use through appropriate testing and analysis. No statement by seller concerning a possible use of any product, service or design is intended, or should be construed, to grant any license under any patent or other intellectual property right.

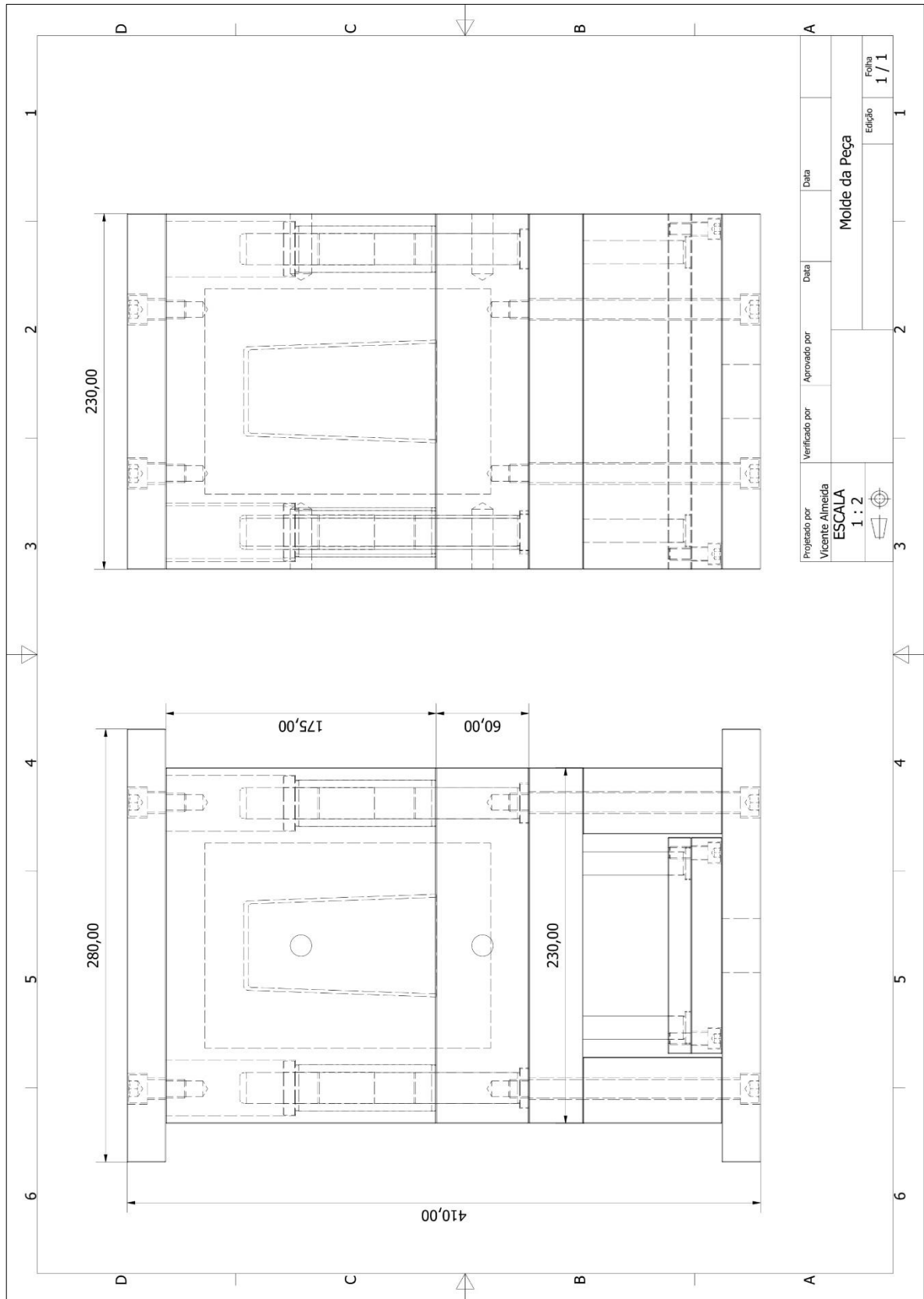
ANEXO B - Desenho da peça e respectiva cotação



ANEXO C - Desenho da peça com cotas críticas e respectiva tolerância



ANEXO D - Desenho do molde da peça



ANEXO E - Ficha técnica do bico quente utilizado

Offene Spitze / Open tip / Pointe ouverte

H33401/... - H334053/...

Techni Shot

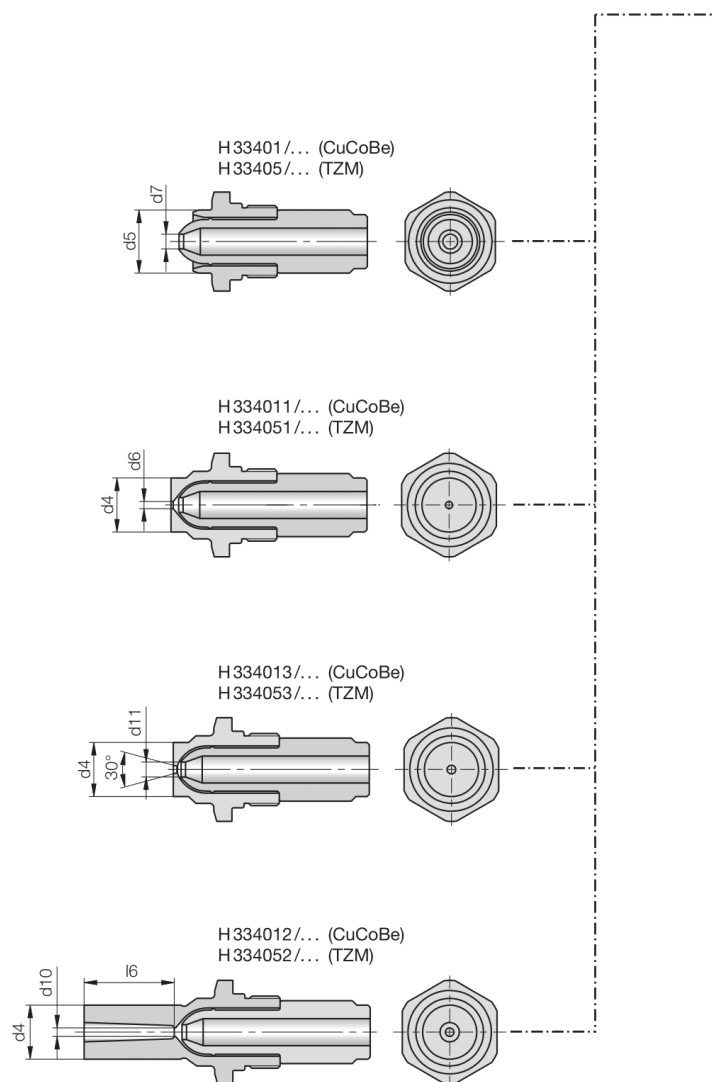
Heißkanaldüse

Hotrunner nozzle

Buse à canal chaud

230 V~

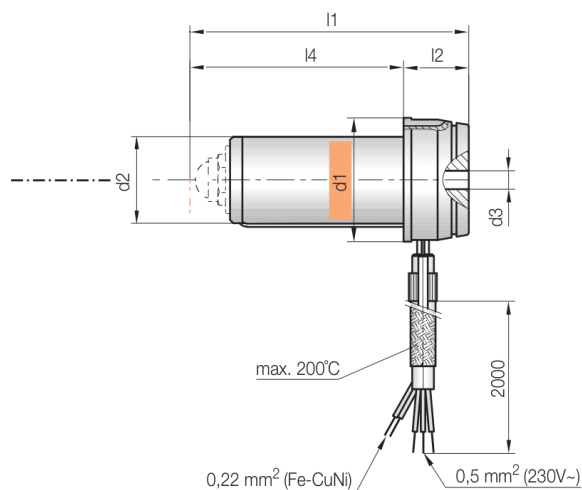
⚡ = Fe-CuNi, Type J



Bestell-Beispiel
Ordering example
Exemple de commande

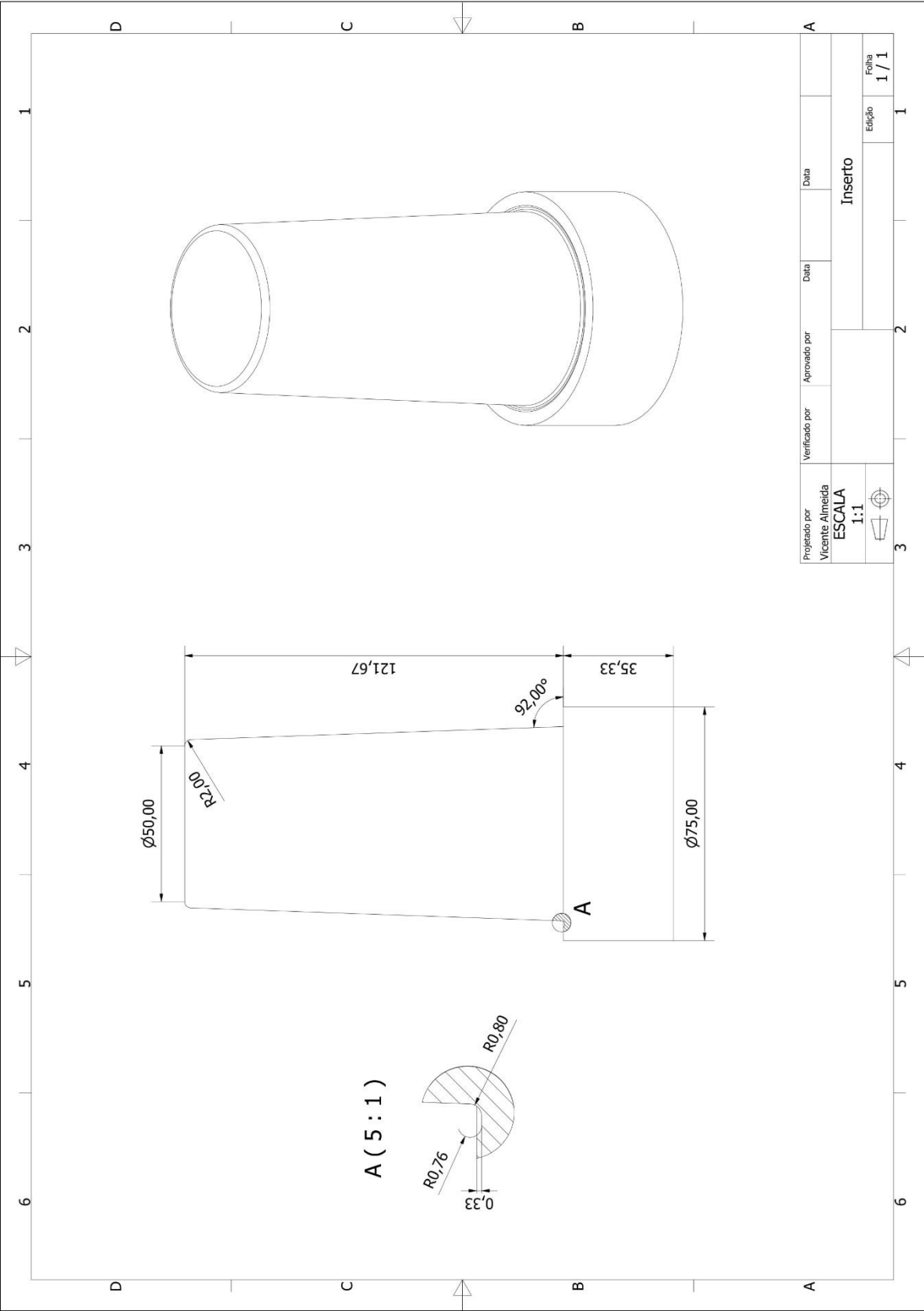
H33401 / 32 x 63
1 2 3

1. Prod. Nr. (siehe Spitzenausführung)
Product no. (see tip design)
Code produit (ref. design de pointe)
2. Größe/Size/Taille ($d1$)
3. Länge/Length/Longueur ($l1$)

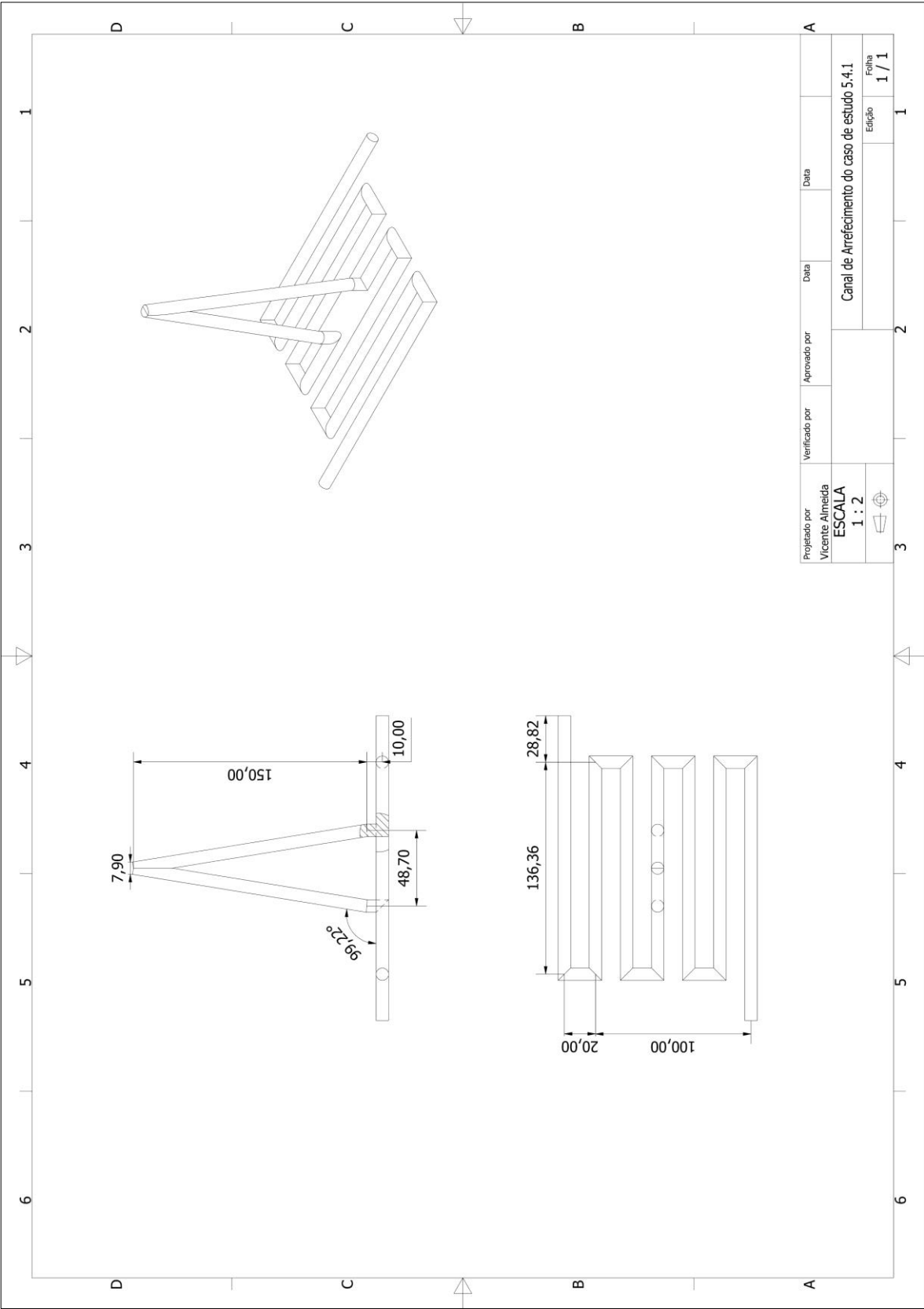


p [W]	l6	l4	l2	d11	d10	d7	d6	d5	d4	d3	d2	d1	l1	Nr./No.
250	15	38	18	1	1,4	2	1	10	8	4,5	18	25	56	.../25 x 56
315		45											63	63
		53											71	71
		62											80	80
400		82											100	100
420		107											125	125
315	20	42	21	1,2	1,6	2,5	1,2	11	10	5,5	22	32	63	.../32 x 63
		50											71	71
400		59											80	80
		69											90	90
		79											100	100
450		104											125	125
400		59	21	1,5	1,9	3	1,5	14	12	6	28	40	80	.../40 x 80
		69											90	90
500		79											100	100
		91											112	112
		104											125	125
630		119											140	140
630	30	73	27	1,8	2,2	4	1,8	18	14	8	35	50	100	.../50 x 100
		85											112	112
		98											125	125
		113											140	140
800		133											160	160
		173											200	200
		223											250	250
500	35	95	30	3,5	4	6,1	3,5	25	20	13	44	60	125	.../60 x 125
630		110											140	140
800		130											160	160
		170											200	200
1000		220											250	250
		270											300	300

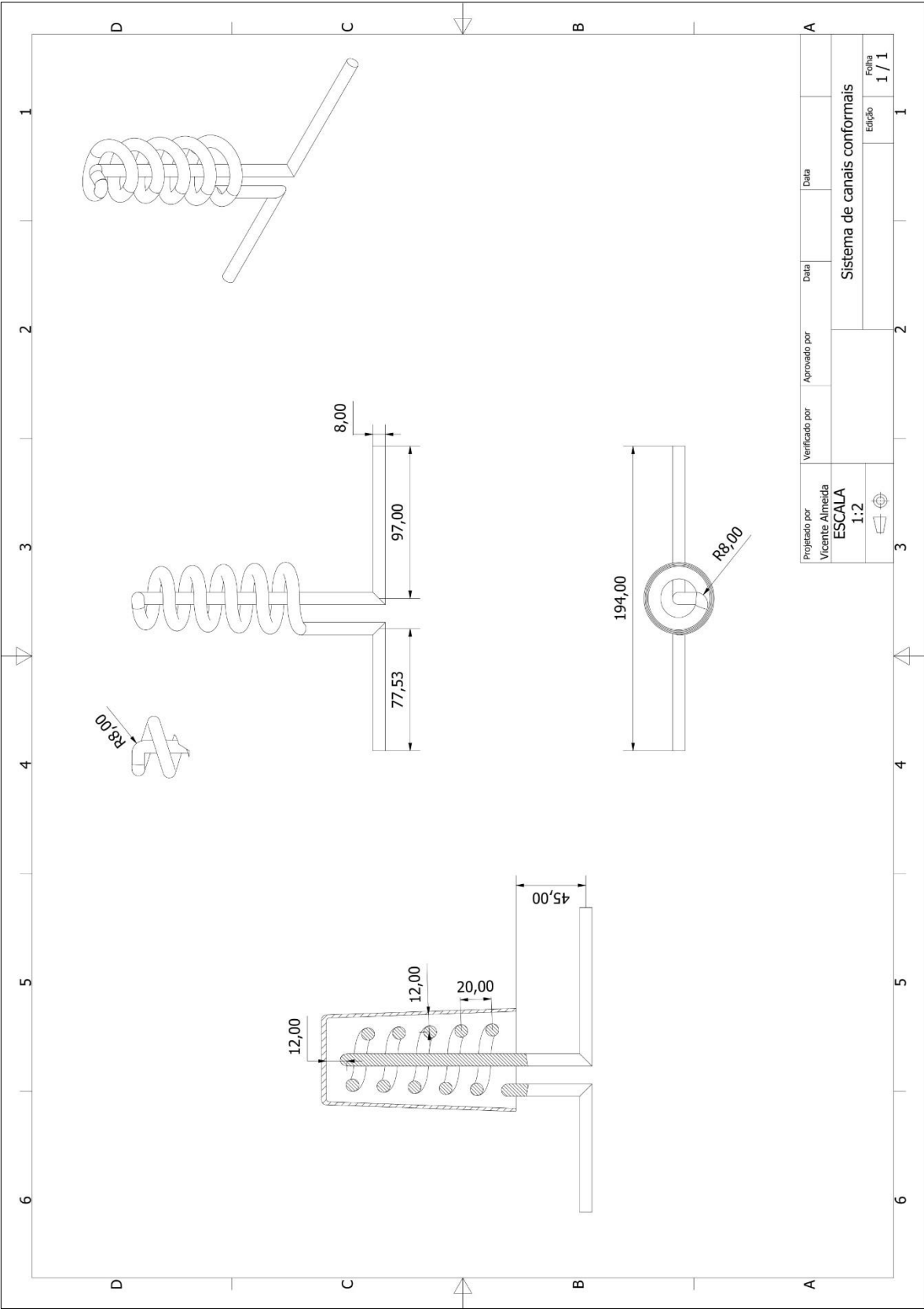
ANEXO F - Desenho do inserto



ANEXO G - Canal de arrefecimento do caso de estudo 5.4.1



ANEXO H – Sistema de canais conformais



ANEXO I – Sistema de canais conformais otimizados

